LE SCIENZE
edizione italiana di SCIENTIFIC AMERICAN

numero 8
aprile 1969
anno II
volume II

Le pitture greche della tomba del tuffatore

Il rinvenimento a Paestum di questa tomba è di straordinaria importanza archeologica perché sono stati scoperti i primi e finora unici esempi di pittura greca di età arcaica o classica.

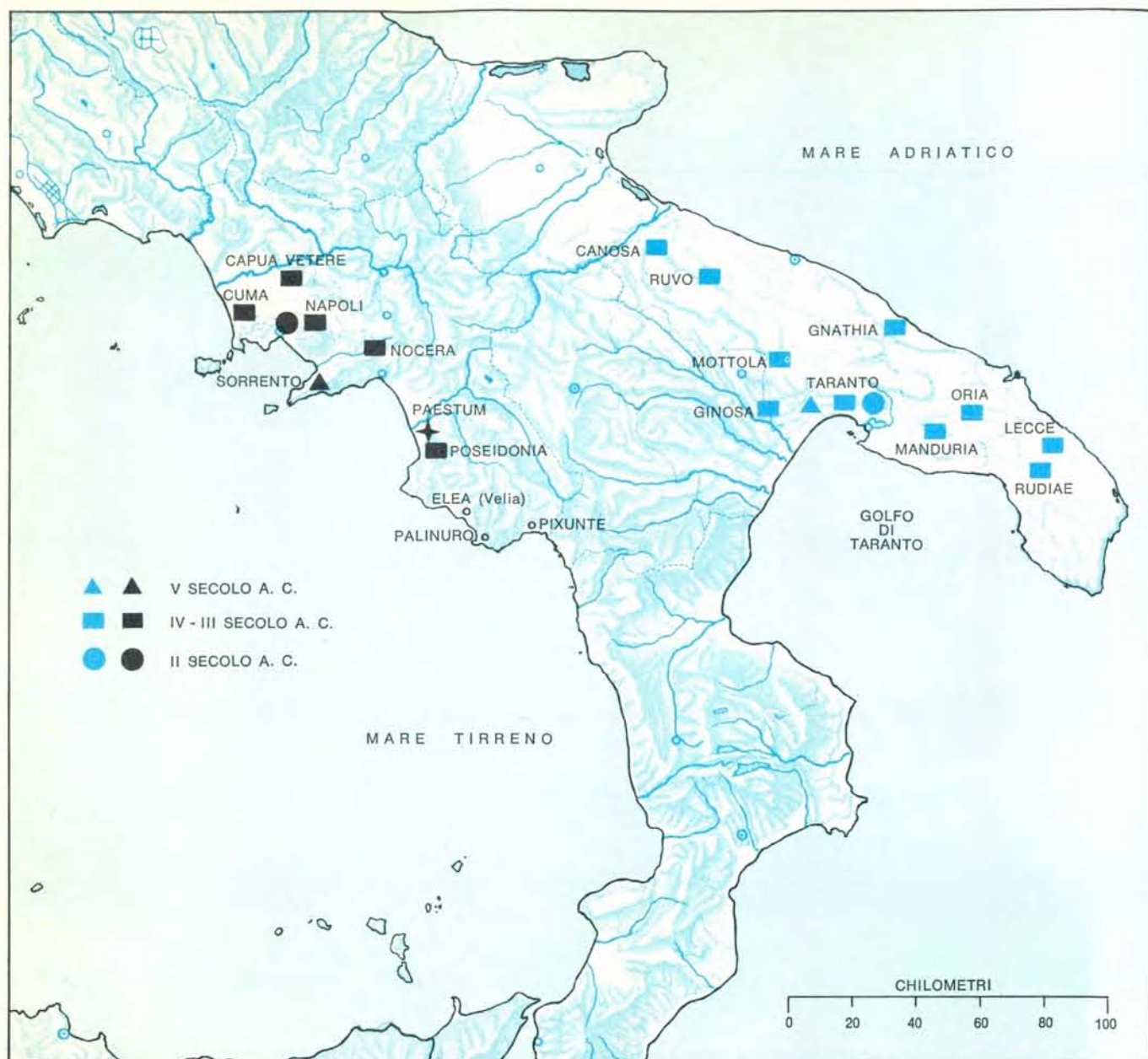
di Mario Napoli

All'inizio dell'estate 1968, gli archeologi che conducevano un saggio di scavo in località Tempa del Prete – in quella fascia del territorio che circonda le mura di Paestum in cui si trovano ampie necropoli, circa un chilometro e mezzo a sud della città – ebbero la ventura di fare quella che si può considerare una delle piú clamorose scoperte archeologiche delle ultime generazioni: sollevato il coperchio della tomba « numero quattro », che era stata con delicatezza liberata dal terriccio, la luce del sole illuminò, dopo due millenni e mezzo di tenebre, alcuni stupendi affreschi dipinti sulle lastre interne.

Era stata rinvenuta a Paestum una pittura greca. Poco dopo la televisione e i giornali si impadronivano della notizia, creando un'ondata di enorme interesse per la nuova scoperta non solo nel mondo degli archeologi ma anche fra coloro che meno immediatamente partecipano a questi problemi.

Che il rinvenimento sia assolutamente eccezionale potremo farlo comprendere, ove vi sia chi questi problemi non conosca, in poche parole, dicendo che questa di Paestum è la prima e unica pittura greca di età arcaica o classica che esista al mondo: prima che si rivelasse attraverso questo rinvenimento, noi non possedevamo nessun esempio di pittura uscita dal pennello di un artista greco. Si immagini come sarebbe lacunosa la nostra conoscenza, per esempio, del Quattrocento o Cinquecento italiano, se, sopravvissuti gran parte dei monumenti architettonici e delle sculture, non possedessimo assolutamente nessuna pittura dello stesso periodo! Cosa sapremmo noi della pittura del Quattrocento o del Cinquecento se, per comprenderla, avessimo a nostra disposizione solo alcuni frammenti degli scritti del Vasari?

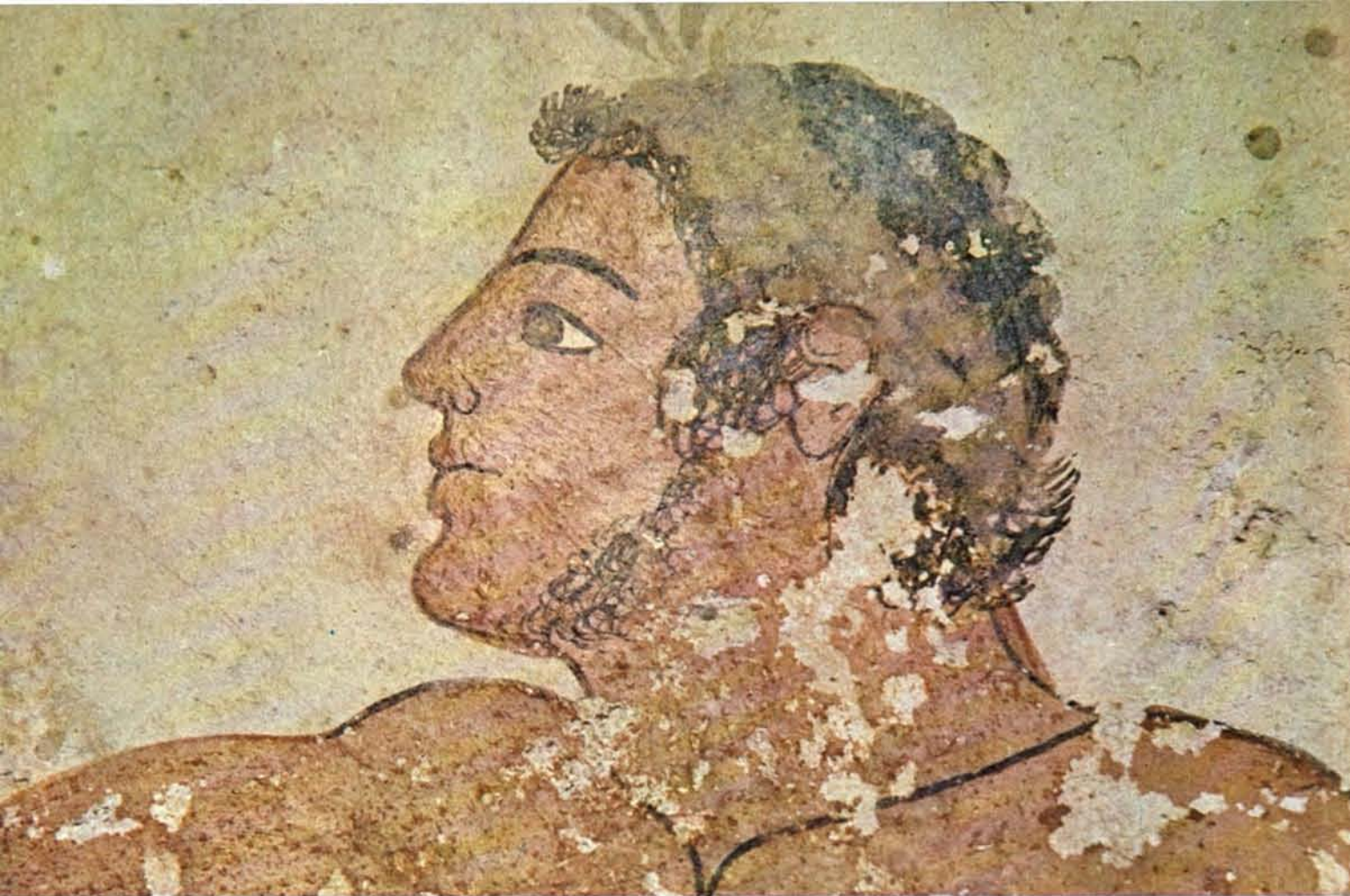
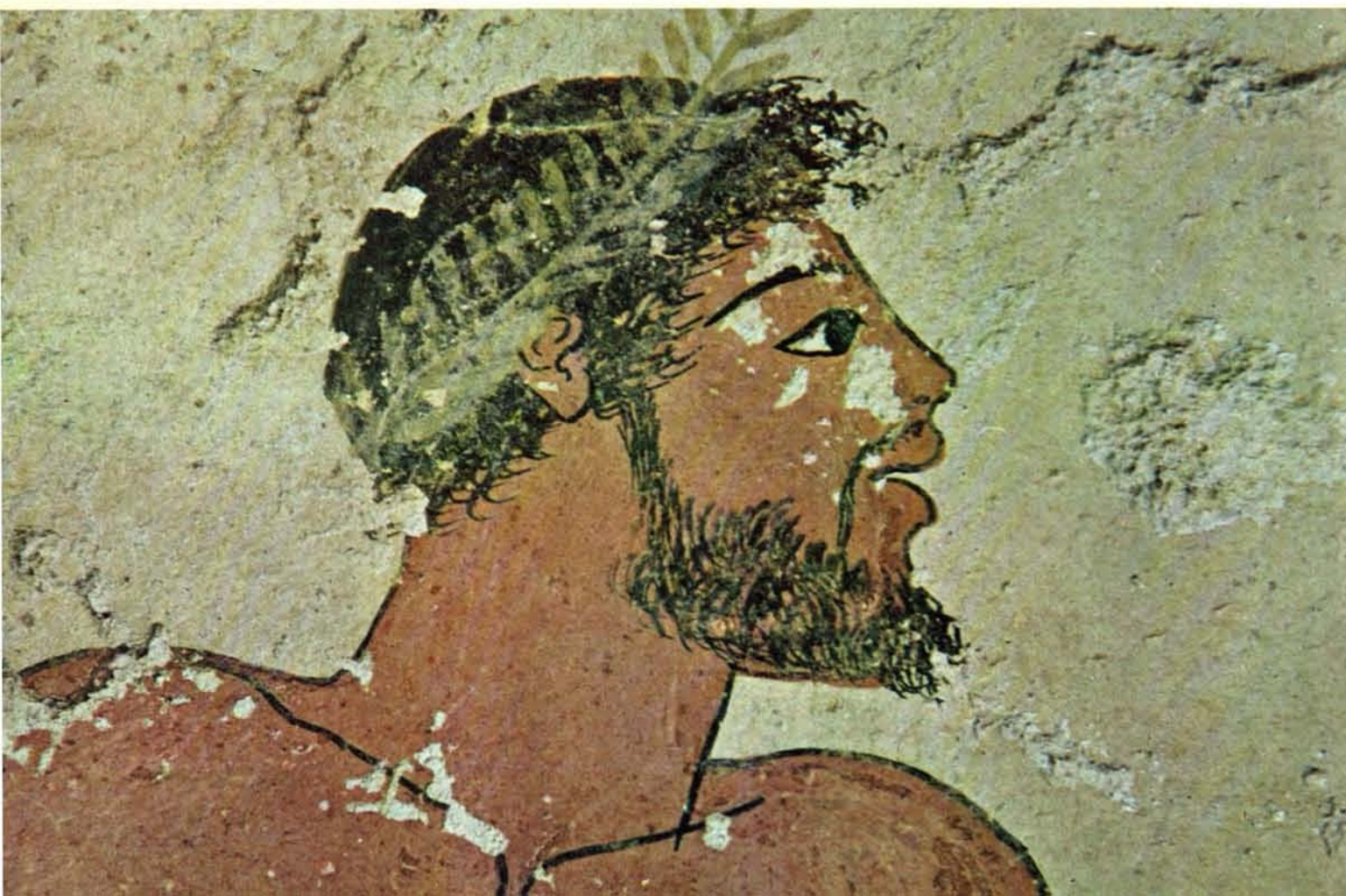
Simile era la nostra posizione, prima della scoperta di Paestum, nei confronti della pittura greca. Noi conosciamo l'arte greca attraverso i resti dei grandi templi e attraverso le sculture, originali o copie, di età romana; siamo in grado di comprendere cosa abbiano rappresentato nel cammino della civiltà le ricerche dell'architettura greca, dai primi tentativi di crearsi una forma architettonica attraverso la quale esprimere le aspirazioni proprie dello spirito greco verso una forma metafisica, sino al pieno raggiungimento di questa aspirazione che si realizza nel Partenone di Atene o nel Tempio di Poseidon di Paestum; conosciamo momento per momento la travagliosa ricerca della scultura greca, dalle forme arcaiche chiuse e delimitate in se stesse sino alla conquista di un totale rapporto con lo spazio; conosciamo le preziose soluzioni grafiche della ceramica dipinta, nelle quali la decorazione condiziona la forma del vaso e ne è a sua volta condizionata, in un'unità e in un'organicità formale che è il segreto di tutta l'arte greca; conosciamo il gusto raffinato e controllato degli artigiani greci nella produzione cosí impropriamente detta dell'arte minore; conosciamo il valore di quest'arte greca, le esperienze della quale hanno condizionato – per quanto queste esperienze potevano essere recepite, filtrando attraverso il mondo romano e bizantino – tutta l'arte della civiltà occidentale sino ai nostri giorni, ma della pittura, invece, conoscevamo solo il nome dei grandi maestri, tramandatici dagli scrittori antichi: Polignoto, Zeusi, per citare solo i piú famosi del quinto secolo; conoscevamo il titolo di qualcuna delle loro opere piú famose e alcuni loro caratteri esteriori, attraverso i quali cercavamo di comprendere la problematica artistica, ma non certo l'arte, la quale è percepibile solo attraverso la conoscenza delle opere.

In cambio si è cercato sempre di comprendere la perduta pittura attraverso lo studio dei vasi dipinti, nella presunzione che in questi vasi fosse presente un'eco, un riflesso della grande pittura o, per lo meno, della sua problematica. Era evidente che la ceramica con decorazioni figurate non potesse rendere né il respiro, né l'ampiezza della grande pittura, purtuttavia, in sua assenza, non vi era altra possibilità per accostarci alla pittura greca. Ma si era

L'uso di dipingere l'interno delle tombe è documentato nell'antichità, a partire dalla metà del quarto secolo avanti Cristo, in territori periferici rispetto alla Magna Grecia. Piú diffusa l'abitudine di dipingere l'interno di vaste tombe sotterranee a camera, uso questo di origine orientale; meno diffusa quella di dipingere l'interno delle tombe a cassa, come quella di Paestum, uso che sembra piú caratteristico del mondo occidentale. Una prima zona con tombe a cassa dipinte (*in nero*) è in Campania, e si concentra intorno a Capua Vetere e Paestum: siamo quindi in ambiente osco-lucano. La datazione delle tombe di Nocera e Sorrento non è del tutto certa; nelle località indicate col cerchietto sono attualmente all'opera gruppi di ricercatori. La seconda zona (*in colore*) è nelle Puglie, pertanto in ambiente apulo, con numerose tombe dipinte sia a camera sia a cassa.

percepito che, se in alcuni momenti era probabilmente esistito un rapporto molto stretto tra pittura e ceramica, in altri momenti, come per esempio nei primi decenni del quinto secolo avanti Cristo, doveva essersi determinata una netta frattura tra pittura e ceramica, perché quest'ultima non aveva potuto seguire l'accelerato ritmo di quelle conquiste formali che la pittura, stando alle notizie tramandateci dagli antichi, andava rapidamente facendo proprie. Comunque il rapporto tra ceramica e grande pittura era sempre un fatto ipotetico, un'ipotesi di lavoro, non potendosi porre su un piano rigoroso un rapporto tra due termini, uno dei quali noto, cioè la ceramica, l'altro del tutto ignoto, cioè la pittura.

La pittura greca era pittura da cavalletto e pittura muraria; l'una e l'altra sono andate completamente distrutte, col trascorrere dei secoli, per la caducità della materia, né sembrava potersi mai sperare di trovarne traccia alcuna, perché non era costume del mondo greco, almeno cosí si riteneva, dipingere le tombe.

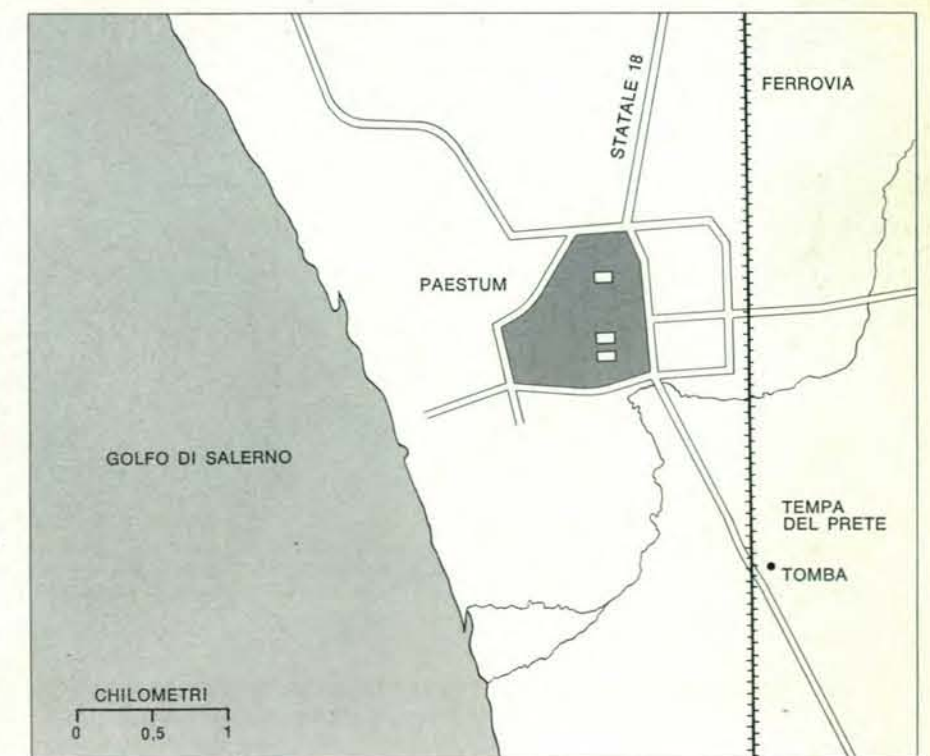
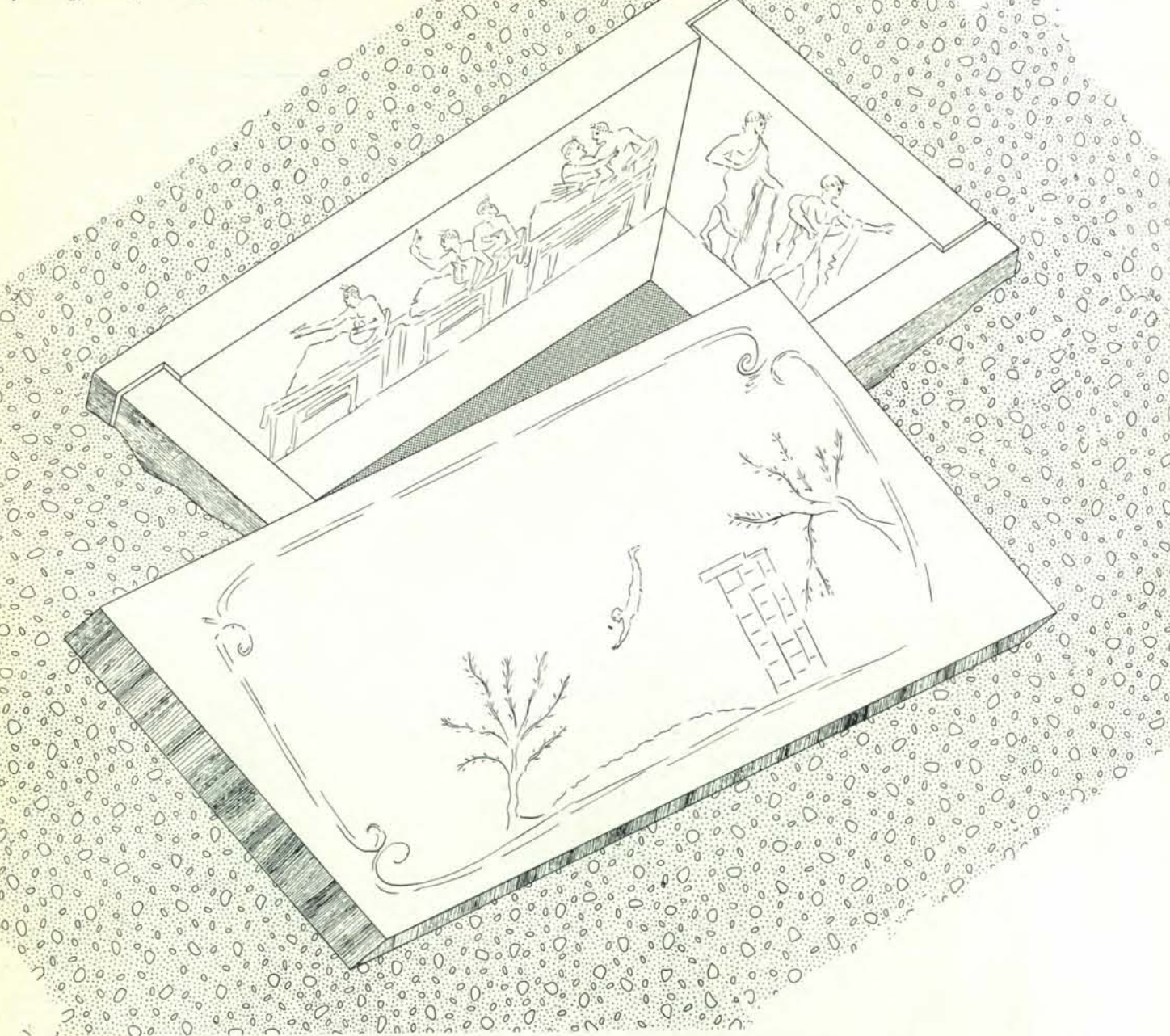
Quanto possediamo di pittura antica, per i secoli piú lontani da noi, è esclusivamente pittura funeraria: per esempio, tutta la grande pittura etrusca – come la meno nota, ma non per questo meno importante, pittura lucana – è sempre pittura che decora l'interno delle camere sepolcrali o dei sarcofagi. Tenendo presente questi due fatti appare chiaro che non solo l'archeologo e lo storico dell'arte antica dovevano constatare la distruzione della pittura greca, ma dovevano anche ammettere che non vi era nessuna possibilità che un giorno questa lacuna avrebbe potuto essere colmata.

Le due lastre lunghe della tomba del tuffatore sono diversamente conservate e sembrano anche qualitativamente diverse. Nei particolari a colori della lastra meglio conservata (*si veda l'illustrazione a pagina 18*) si evidenzia l'alta qualità di questa pittura, tenuta sui colori fondamentali (rosso, nero, giallo, azzurro). Colpisce la conseguita individualità dei volti, colti in atteggiamenti ed espressioni del tutto diversi: l'empito bramoso e il ritegno falsamente pudico nella coppia di amanti (*sopra*), la concentrata nobiltà del giocatore di *kottabos* (*sotto*). Si tratta di qualcosa di nuovo nell'arte greca del quinto secolo a.C.

Altri due particolari della lastra meglio conservata. Il secondo giocatore di *kottabos* (*sopra*) è colto in un'espressione di vigile attenzione, l'altro personaggio (*sotto*) segue con concupiscente stupore la coppia di amanti (che nella lastra figurano alla sua sinistra). Il disegno appare estremamente sobrio, la linea costruisce l'immagine con sicurezza e libertà. L'ignoto pittore è sicuro della sua tecnica, e lo si nota nel gruppo degli amanti (raffigurato in alto nella pagina precedente) e nel modo con cui tratta il colore, distendendolo non uniformemente, ma caricandolo di ombre, così da anticipare soluzioni di pittura tonale.

Moltissime sono le tombe greche del sesto e quinto secolo avanti Cristo scavate sino a oggi in tutta l'area caratterizzata dalla cultura greca, cioè in Asia Minore, nella Grecia peninsulare e insulare, nell'Italia meridionale e in Sicilia, ma mai se ne era trovata una dipinta, per cui non sarebbe stato scientificamente possibile e corretto ipotizzare che avremmo potuto rinvenire della pittura greca attraverso l'unica via possibile, cioè la pittura funeraria.

Si comprenderà, quindi, lo stupore suscitato nell'ambiente scientifico dalla notizia del rinvenimento di una tomba greca dipinta, stupore che doveva trasformarsi in entusiasmo nel momento in cui è apparso chiaro che non vi era alcun dubbio sulla « grecità » di queste pitture e la sua altissima qualità sul piano puramente estetico.

La totale mancanza di pittura greca non si limita all'età arcaica e classica, ma si estende a tutta l'età puramente greca, cioè sino al primo secolo avanti Cristo. A partire da questo momento subentra per noi quella pittura che è comunemente detta pompeiana, perché ha in Pompei il centro dove è maggiormente conservata (così come nelle altre località archeologiche di Ercolano e Stabiae in Campania) ma che si trova anche ben documentata in altri centri, e tra questi nella stessa Roma. Non possiamo certamente chiamare greca tutta questa pittura, anche se in qualche caso è di mano greca (è comunque di età relativamente recente, e presenta una sua problematica che non interferisce se non marginalmente e di riflesso con la pittura greca scoperta a Paestum). Se quindi possiamo prescindere da questo capitolo della pittura antica, non possiamo, però, non considerare che esistono alcune documentazioni di pittura in tutto il mondo periferico rispetto all'area culturale greca, periferico sia in senso geografico che cronologico.

Basterà ricordare la pittura etrusca, quella lucana, quella apula, per tacere della pittura di ambienti ellenizzati del Mar Nero: tutta questa pittura, che è di carattere funerario, è però, salvo rarissimi casi – e indipendentemente dalla pittura etrusca, per la quale bisognerà fare un discorso completamente diverso – tutta databile a partire dal quarto secolo inoltrato. La pittura cosiddetta lucana è quella delle tombe dipinte del quarto secolo avanzato e che si trovano in particolare a Paestum, ma che sono tipiche, sembrerebbe, di tutta l'area tra questa città e, più a nord, Capua (*si veda l'illustrazione a pagina 10*). Pare che se ne siano trovate anche del quinto secolo, ma la notizia è incerta, essendo andato distrutto molto; comunque sembra che non abbiano nulla a che fare con la pittura greca. La regione pugliese, da Canosa alla greca Taranto, è ricca di tombe dipinte, ma sono pitture non più antiche della metà del quarto secolo e che giungono sino al primo secolo avanti Cristo, sviluppandosi quindi lungo tutto il corso dell'età ellenistica (*si veda l'illustrazione a pagina 10*). Si tratta di pitture, in particolare per le età più antiche, soprattutto a carattere decorativo, non figurativo; così come sono affrescati solo con motivi ornamentali quei sarcofagi dipinti di Taranto che possono essere datati all'inizio del quinto secolo, nella stessa età, cioè, della tomba greca di Paestum. Tutto questo mondo campano e apulo documenta che si usava dipingere gli interni delle tombe, anche con scene figurate, in particolare nell'area campana tra Capua e Paestum; ma, indipendentemente dal fatto che non siamo sicuri se quest'uso sia databile già al quinto secolo avanti Cristo, è chiaro che il fenomeno resta fuori dell'ambito culturale greco.

Diversa è la situazione della pittura etrusca, la quale raggiunge il suo momento di massimo splendore tra la fine del sesto e gli inizi del quinto secolo avanti Cristo, per riprendere poi nuovo vigore, dopo un periodo di stanchezza, a partire dalla metà del quarto secolo, nell'ambito, quindi, di tutta una fioritura della pittura funeraria figurata che, a torto, viene giudicata di ispirazione etrusca. A torto, diciamo, perché questa pittura la troviamo fiorire, sempre a partire dalla metà circa del quarto secolo, anche in aree che non possono aver subito alcuna suggestione etrusca, come, per esempio, quella già ricordata del Mar Nero. Comunque apparirà logico che la notizia del ritrovamento di una pittura greca degli inizi del quinto secolo abbia subito fatto sorgere quasi spontaneamente il quesito di un eventuale rapporto tra questa nuova pittura e quella coeva, e anche più antica, fiorita in territorio etrusco, in particolare se si considera che oggi è sul tappeto in maniera molto urgente il problema storico delle correlazioni tra il mondo greco della Magna Grecia e quello dell'area etrusco-laziale. Ci si è chiesto cioè, se, ed eventualmente in che misura, la grecità dell'Italia meridionale abbia partecipato con funzione determi-

Tutta l'area intorno a Paestum è ricca di necropoli, essendo in antico rigoroso il divieto di seppellire i morti nell'interno della città. Tali necropoli cominciano immediatamente fuori le mura e si estendono per una profondità di circa due chilometri, e infatti la tomba del tuffatore è stata rinvenuta ad oltre 1500 metri dalla città, sul lato meridionale, ove già nei tempi precedenti erano state segnalate tombe di fine sesto secolo e inizi quinto. Di queste ne erano state scavate un numero relativamente minimo, essendo più nota la necropoli di età lucana, cioè della fine del quinto secolo e di tutto il quarto. La località ove si è rinvenuta la tomba del tuffatore è detta Tempa del Prete, e viene a trovarsi ai margini della statale 18, che conduce verso Agropoli, Velia e Palinuro: anche in antico doveva correre a questa altezza, attraverso la piana di Paestum, la strada che conduceva verso il sud, collegando Paestum con Velia.

La tomba, qui raffigurata per semplicità come se fosse in superficie, è stata rinvenuta in realtà a un metro e venti di profondità: era ricoperta da un primo strato di recente formazione (cm 30), da un secondo strato calcareo compatto (cm 45) formatosi dai depositi del fiume Salso che ha invasa la piana di Paestum già in età tardo antica (forse nel quinto secolo d.C.) e da un terzo strato di terreno vegetale antico (cm 45) che indica la reale profondità entro la quale fu a suo tempo incassata la tomba.

nante alla formazione culturale, intesa in senso molto ampio, del mondo etrusco e del mondo di Roma, già in età arcaica, cioè prima della fine del quinto secolo. Nel vivo di questa problematica storica ecco che, con una fortunata coincidenza di tempo, si è venuta a porre la scoperta delle pitture di Paestum, le quali, per quanto si è sin qui detto, e per alcuni particolari che presto vedremo, pongono il problema del rapporto grecità-etruscità su un imprevedibile piano di cultura artistica.

Ma prima di esporre i vari problemi che queste pitture pongono, guardiamo un poco da vicino quest'opera d'arte greca venuta improvvisamente alla luce. Si tratta di una normale tomba a cassa, formata cioè da due lastre lunghe (circa due metri e trenta centimetri) che fungono da laterali della cassa e da due lastre corte (poco piú di un metro) che formano le testate, tutte alte circa un metro; la quinta lastra, quella di copertura, è un unico blocco (oltre due metri e 30 centimetri per poco piú di un metro) e presenta l'anomalia di essere dipinta nella faccia interna, come le altre quattro lastre (*si veda la figura a pagina 16*). Già questa costituisce la prima novità, non essendo stato registrato, prima di questo caso, che una tomba presentasse affreschi oltre che sulle quattro lastre, formanti la cassa, anche sulla lastra di copertura; cosí sono cinque i riquadri di pittura greca rivelati da questa scoperta.

Nell'interno della tomba vi erano scarsi resti della deposizione: un chiodo, e una *lekytos* attica a corpo nero, con decorazione a palmette sulle spalle risparmiate, databile, con assoluta certezza, intorno al 480 avanti Cristo (*si veda l'illustrazione qui a destra*). Questo vaso costituisce un punto di partenza per la datazione della tomba, datazione che anche in base all'analisi stilistica degli affreschi deve essere fatta risalire al decennio 480-470 a.C.

Esaminiamo le singole lastre. Sulle due lastre lunghe è dipinta una scena conviviale a carattere funerario, scena già nota sia attraverso la pittura etrusca, sia attraverso numerosi vasi dipinti greci del sesto e del quinto secolo. Sulla prima delle due lastre (*si veda la figura a pagina 18*) vi sono tre *klinai* (letti): su ciascuno dei primi due sono sdraiate due persone, sul terzo una sola persona; davanti a ciascun letto è un trapezoforo (tavolino) ornato di rami verdi, sui quali sono delle *kyliches* (coppe), quando queste non sono tenute in mano dai personaggi rappresentati; la composizione raffigurata sulla seconda lastra lunga è identica a quella della prima, anche se i vari personaggi, che in entrambe le lastre hanno il capo circondato da una corona di foglie, sono in atteggiamenti del tutto diversi (*si veda la figura a pagina 19*).

Nella prima lastra, da destra a sinistra, abbiamo sul primo letto due personaggi maschili: quello di destra con gesto avido, sottolineato dalla bocca semiaperta e dallo sguardo vivo, attira a sé l'altro personaggio, anche questo virile, ma dalle labbra rosse e dal profilo purissimo. È chiaramente un giovane efebo che ha suscitato i desideri del suo compagno di convito, che egli tenta, ma non con molta convinzione, di allontanare, allungando in avanti il braccio sinistro, mentre con il destro stringe a sé uno strumento a corda. Non ci stupisce in un convito funebre questa scena di amore omosessuale, alla quale le rappresentazioni che troviamo sulla ceramica greca e quanto conosciamo circa i costumi greci ci hanno da tempo abituati; restiamo, piuttosto, colpiti dal fatto pittorico, dalla forza e dalla sicurezza attraverso le quali sono rese le solenni strutture dei due personaggi, dalla essenzialità e dalla disinvoltura dell'ampio disegno, dalla coerenza compositiva che lega in un'unica immagine due cosí diversi personaggi. Sul secondo lettino sono ancora due personaggi, intenti questi, come l'altro isolato sul terzo lettino, al gioco del *kottabos*, un gioco di antichissima origine sicula, subito adottato dai greci, e consistente nel rilanciarsi, con abile gesto, il vino contenuto in alcune coppe svasate. Ma sul secondo letto il primo personaggio si è distratto dal gioco e si volge indietro per guardare con avidità e con bramosia gli approcci amorosi dei primi due personaggi, mentre il suo compagno ha alzato in alto il braccio, sostenendo un po' in bilico la coppa, avendo passato il dito indice nell'ansa con gesto di estrema eleganza, reso da un disegno esperto e molto raffinato. Anche questi due personaggi sul secondo lettino sono costruiti con saldezza di immagine e, nello stesso tempo, con rigorosa coerenza compositiva; anche in questo particolare si coglie l'organicità propria della visione artistica greca, e che ancor piú si chiarisce nel personaggio rappresentato sull'ultimo lettino di questa prima lastra, nell'ampiezza del gesto espresso dal braccio disteso e dalla mano che regge la coppa e nella contenuta nobiltà.

Appare, a questo punto, un problema di interesse metodologico. Le pitture che stiamo esaminando non possono assolutamente, per vari motivi, essere datate a un'età piú antica del 480 a.C. o piú recente del 470 a.C., eppure c'è qualcosa che ci spingerebbe anche verso una data piú recente, verso il 460 a.C.: questo qualcosa consiste in una certa sensibilità che si evidenzia in particolare nell'ultima figura esaminata, la quale già sembra anticipare soluzioni proprie del momento classico dell'arte greca, quel momento che, iniziando verso la metà del quinto secolo, si protrae sin circa la metà del quarto secolo a.C. Come mai tutto ciò? Probabilmente dovremo avanzare l'ipotesi che, per un fenomeno che la storia dell'arte in genere ampiamente documenta, certe innovazioni, certe ricerche nuove, certe soluzioni siano innanzitutto risultati della ricerca pittorica. Dovremo, cioè, ammettere che nel corso dell'arte greca la pittura sia in anticipo nei confronti delle altre forme d'arte, e ciò potrebbe anche farci comprendere perché in antico la pittura fosse considerata un po' come l'espressione artistica piú valida. Ovviamente in queste prime osservazioni, fatte ancora sotto l'emozione del rinvenimento, esprimiamo piuttosto delle ipotesi di lavoro per una piú meditata ricerca, che dei giudizi definitivi.

Osserviamo ora la seconda lastra lunga: abbiamo già detto come la sintassi compositiva ripeta quella della prima lastra. Essa, che è leggermente guasta, sembra qualitativamente meno felice e riuscita della prima. Sul primo lettino ci sono due personaggi: il primo, rapito in estasi, guarda in alto, mentre il secondo suona il doppio flauto. Sul secondo lettino ci sono due personaggi in atto di conversare o di cantare, sul terzo un suonatore di strumento a corda.

Delle due lastre corte, la prima non offre alcuna incertezza, mentre la seconda può essere spiegata in vario modo. Infatti sulla prima lastra (*si veda la figura in alto a pagina 17*) è rappresentato un efebo nudo, di profilo a sinistra, col braccio sinistro poggiato sul fianco e con il destro dritto in avanti, reggente con la mano un vaso, precisamente una *oinochoe* non ben conservata nella pittura: la figura giovanile è molto esile e è resa, mediante forme asciutte e snelle, con una ricerca di grazia e di leggerezza. Alle spalle dell'efebo c'è un alto tavolino, ornato di fronde, sul quale troneggia un grande vaso scuro, un cratere, dalla larga bocca e dalle anse ricurve molto alte. Non v'è dubbio che qui è rappresentato l'efebo coppiere che mesce il vino ai convitati. In queste prime tre lastre, quindi, si conchiude la scena del convito funebre, che si articola in giochi, canti, suoni, amori, secondo il costume greco: il pittore ha voluto qui eternare questo convito affinché accompagnasse in eterno il morto nella via dei secoli.

Fra gli scarsi resti della deposizione rinvenuti nella tomba l'oggetto piú importante è questo vaso decorato che può essere datato, con assoluta certezza, intorno al 480 a.C. Grazie a esso e all'analisi stilistica degli affreschi, si può far risalire la tomba al decennio 480-470 avanti Cristo.

Nella seconda lastra corta sono raffigurati tre personaggi, tutti di profilo, che da sinistra avanzano verso destra (*si veda la figura in basso a pagina 17*). Il primo è un uomo giovane, ma non giovanissimo, dalla corta barbula, avvolto in un manto pesante, bianco a pallini scuri, con una fascia scura agli orli: il manto gli lascia scoperta gran parte del petto. Ha nella mano sinistra un alto bastone. Il secondo personaggio

In uno spazio infinito, pittoricamente realizzato dai due alberelli, si staglia la figura di un tuffatore, che, gettandosi dall'alto di un trampolino, sta per immergersi in uno specchio d'acqua. È una scena di libera invenzione, lontana cioè da ogni schema conosciuto, che il pittore ha sentita come quadro a sé, per cui l'ha delimitata con una cornice dipinta. Sia che rappresenti una scena di vita quotidiana, cioè un tuffatore nell'esercizio del suo sport preferito, sia che rappresenti una scena allegorica della morte, questo dipinto resta sempre uno dei prodotti più alti e sconcertanti dell'arte greca.

incede verso destra a passo di danza, è completamente nudo, salvo una fascia di stoffa leggera di color verde che gli gira alle spalle, ricadendogli in avanti sugli avambracci: il braccio destro è ripiegato sul fianco, il sinistro è teso in avanti con la mano leggermente alzata. Il terzo personaggio è rappresentato da una piccola figura femminile che suona il doppio flauto: è una figura deliziosa, tutta disegnata bianco su bianco, salvo i capelli neri che appaiono al di sotto di una cuffietta rosso scuro. Veste un abito bianco lungo sino ai piedi, al di sopra del quale c'è un manto, pure bianco, di stoffa più pesante che giunge poco più giù del ginocchio.

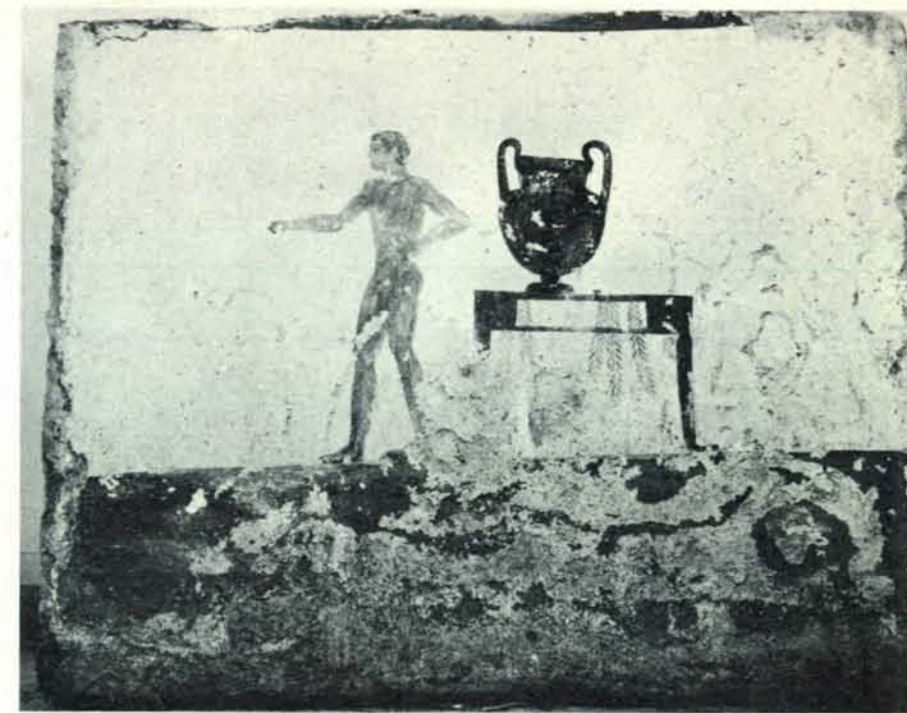
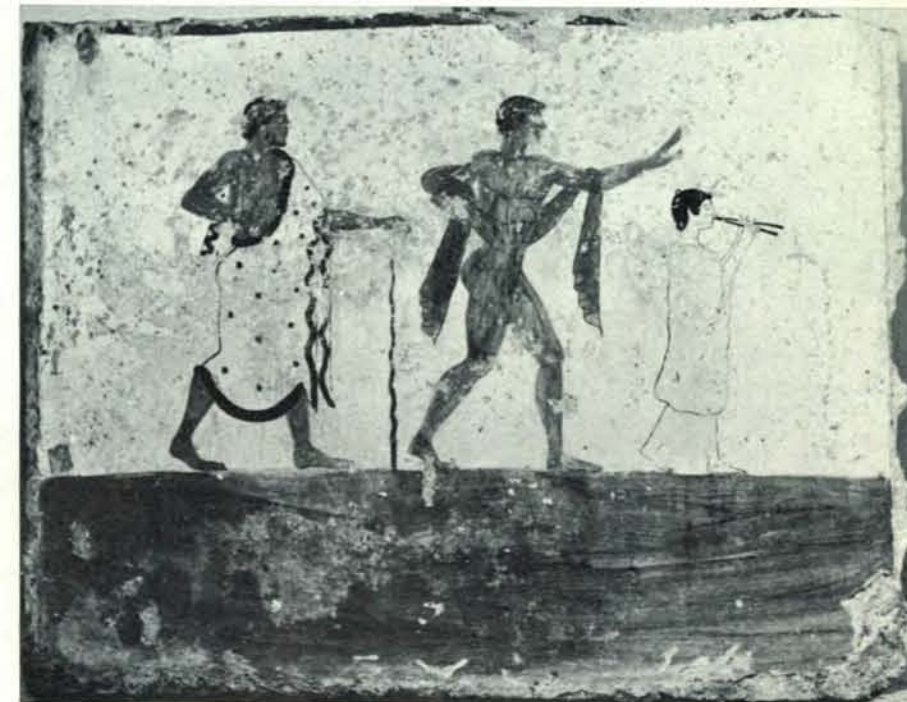
Cosa rappresenta questa lastra con tre personaggi? La prima interpretazione è che nella figura centrale, quella del giovane nudo, si debba vedere il defunto, rappresentato nel momento del suo transito da questa all'altra vita, avendo alle spalle il pedagogo ed essendo preceduto dalla giovane flautista. Questa interpretazione trova conforto in numerose altre raffigurazioni simili o similari. Ciò non toglie che la scena della lastra potrebbe essere spiegata in maniera diversa, secondo la quale qui avremmo una scena atletica. Si tratterebbe, infatti, di una scena di allenamento, nella quale la figura centrale sarebbe l'atleta, quella alle spalle il pedagogo (diremmo, con parola moderna, l'allenatore): è noto, infatti, che nella Grecia antica gli atleti si allenavano al suono della musica, e usavano portare, pur allenandosi nudi così come gareggiavano, un leggero mantello per proteggersi dal sudore. Quale delle due è l'interpretazione esatta? Rispondiamo, e anche in questo caso diamo la risposta come ipotesi di lavoro, che crediamo più valida la prima soluzione: avremmo qui, a nostro parere, una scena psicopompa, cioè la rappresentazione del transito dell'anima verso l'eterna vita ultraterrena.

Il dubbio sul significato della rappresentazione non deve, però, distrarci dall'interesse pittorico, soprattutto perché in questa lastra si possono cogliere delle assonanze con la pittura etrusca. Però la cultura artistica etrusca ignora la coerenza, i ritmi compositivi, la scansione di questo affresco greco, in virtù dei quali – e si veda in particolare la prima figura – ciò che qui è ricco di una contenuta vitalità, lì diventa formula, espressa più o meno sagacemente, ma pur sempre formula.

Sino a questo momento abbiamo esaminato quattro lastre dipinte, e infatti tutte le tombe dipinte di tipo a cassa che, di qualsiasi età, noi possediamo, si presentano formate da due lastre lunghe e da due lastre corte, e ci danno, pertanto, quattro pareti affrescate; ma la tomba greca di Paestum ci offre, come si è già sottolineato, una anomalia, presentando anche la lastra di copertura internamente affrescata, con l'affresco più straordinario e più interessante, che ha dato il nome alla tomba e all'intero ciclo pittorico: nella lastra di copertura è, infatti, rappresentata la scena del tuffatore (*si veda l'illustrazione in questa pagina*).

Il grande pannello affrescato è delimitato sui quattro lati da una piccola cornice dipinta che agli spigoli si conchiude con un elegante motivo decorativo formato da palmette di tipo attico. Entro questa riquadratura la scena campita sul bianco del fondo, il quale assume un valore di spazio infinito in virtù di due alberelli, posti ognuno su ciascun lato, alberelli che con i rami esili e ornati di piccole fronde, che non credo trovino una classificazione nella botanica, creano un senso di profondità, rompendo l'unità conchiusa del fondo. Nello stesso tempo, i due esili alberelli circoscrivono la scena centrale che diventa in tal modo dominante: verso destra vi è una costruzione eseguita, a guisa di mura, con blocchi squadrati e perfettamente congiunti, con corso irregolare, sulla sommità della quale un blocco più sottile sporge sul lato sinistro, rispetto a tutta la costruzione, mentre sul lato destro si fa più basso, formando quasi uno scalino. È un monumentino che vediamo qui per la prima volta rappresentato, non trovando confronto, a quanto finora io sappia, in nessuna altra raffigurazione greca, e che non può essere interpretato se non come un trampolino per tuffi. La spiegazione ci viene offerta dalla figurina centrale che è quella di un tuffatore: in stile perfetto un giovane nudo si tuffa in uno specchio d'acqua. Dalla punta dei piedi, attraverso le gambe dritte e congiunte, il corpo sottile e le braccia allungate e affiancate, sino alle mani, è un'unica linea sottile e nervosa, ricca di movimento controllato, che scivola nello spazio, su uno sfondo infinito. Solo il capo è leggermente sollevato, e sappiamo che di qui a un attimo quando il corpo starà per penetrare nello specchio d'acqua, il tuffatore abbasserà il capo tra le braccia, affinché perfetta sia l'entrata in acqua. Possiamo pertanto ancora contemplare quel volto: un profilo aguzzo e nitido, le labbra serrate, l'occhio vivo e attento, il mento ricoperto da una barba rada e corta, come si addice a un giovanetto. Annotazioni di una verità colta nei suoi elementi essenziali sono in quegli occhi, in quel profilo, in quella barba leggera: annotazioni di verità ancora più evidenti nella resa del pube e nell'attenzione posta nell'annotare le alterazioni subite dai genitali nel moto di caduta, dall'alto verso il basso, del corpo.

Lo specchio d'acqua ove il tuffatore sta per immergersi è reso con una linea curva a onde, che delimita una zona di color verde-azzurro. Nel convenzionalismo arcaico la curva sta a rappresentare la linea dell'orizzonte resa con ribaltamento planimetrico e, pertanto, spezzata dal moto delle onde.

La scena è chiara: abbiamo qui la rappresentazione di un tuffo. Ma perché è stata dipinta in una tomba, che significato ha questa scena? Anche qui ci troviamo di fronte a una duplice interpretazione: o si è voluto solo rappresentare un tuffo, come fatto reale, oppure questo tuffo ha un significato allegorico. Il primo caso è molto suggestivo, perché ci spinge a vedere in questa scena un episodio reale, diremmo di vita vissuta, che si concretizza in quel senso di verità che c'è nel tuffatore, nel suo volto sottile e leggermente malinconico, nelle ricordate annotazioni realistiche del corpo: in questo caso dovremmo pensare che la scena raffiguri qualcosa di molto vicino al defunto chiuso nella tomba: che sia stato, in questa tomba, deposto un atleta, in particolare un nuotatore o un tuffatore morto in giovane età? A questo interrogativo dobbiamo rispondere in maniera affermativa, solo se crediamo di vedere in quella del tuffo una scena di vita vissuta, perché solo se c'è correlazione tra la scena rappresentata e quella che è stata la vita del defunto può giustificarsi che si sia dipinta tale scena nel chiuso di una tomba. In tal caso la suggestione ci spinge a compiere ancora un ulteriore passo avanti, offrendoci la possibilità di ipotizzare anche chi possa essere stato il giovane atleta in onore del quale è stata dipinta questa tomba: noi sappiamo che un giovane cittadino pestano si distinse nella Olimpiade 78, cioè in quella dell'anno 468

Sul primo dei lati corti è rappresentato un giovane efebo nudo, che distribuisce ai convitati, con una *oinochoe* che ha nella mano destra, e che si vede appena, del vino prelevato da un grande vaso (un cratere) poggiato su un piccolo tavolino ornato di ghirlande. L'esile ed elegante nudo dell'efebo è esaltato dal contrasto con l'ampia sagoma del cratere.

La seconda lastra piccola ci offre una scena variamente interpretabile: i tre personaggi rappresentano forse il pedagogo (*a sinistra*) e una giovane suonatrice di flauto (*a destra*) che simbolicamente accompagnano, con mesto corteo, il defunto (*al centro*) nel suo ultimo viaggio verso l'aldilà. Vi si potrebbe vedere anche una scena di allenamento atletico al suono della musica, sotto il vigile sguardo dell'allenatore.

Nella prima lastra è rappresentata una scena conviviale: è la piú bella delle quattro lastre formanti la cassa, sia per la qualità del disegno che per la forza e la coerenza della composizione. È un banchetto funebre, secondo l'uso greco ampiamente documentato dàlla letteratura e dai dipinti su vasi; a destra i due personaggi, un uomo barbuto ed un efebo dalle rosse labbra, sono intenti ad approcci amorosi, mentre gli altri tre personaggi giocano al *kottabos*, lanciando lontano con delle coppe svasate del vino. È questo un gioco di origine sicula, che i greci fecero proprio e riprodussero su numerosi vasi dipinti.

Il banchetto funebre si sviluppa nella seconda lastra lunga, ove la scena ripete lo schema compositivo della prima, e infatti anche qui ci sono cinque personaggi distribuiti su tre lettini. A destra il primo personaggio sembra rapito in estasi, alla musica che il suo compagno trae dal flauto; seguono due altri che sembrano discorrere, mentre sull'ultimo lettino una superba figura di suonatore di strumento a corda, volgendosi indietro, chiude la scena. Compositivamente molto coerente, l'affresco di questa lastra, che è peraltro un po' guasta, non è cosí rigoroso come quello della prima.

a.C., riportando la vittoria nello stadio e nel diaulo (il diaulo era una gara di corsa che si svolgeva su un percorso di circa 360 metri), né abbiamo notizie di altri pestani vincitori ai giochi olimpici: il suo nome era Parmenides. Che la tomba del tuffatore sia la tomba di Parmenides? L'ipotesi è estremamente fascinosa, ma trova ostacoli in due considerazioni: la prima è nel fatto che difficilmente la tomba può essere piú recente, sia pure di poco, del 468 a.C.; la seconda è nella constatazione che, a differenza di quanto si usi oggi, i tuffi non facevano parte dei giochi olimpici. Dobbiamo, sia pure a malincuore, escludere che questa sia la tomba dell'olimpionico Parmenides, e resta in piedi solo l'ipotesi che si tratti della tomba di un atleta a noi sconosciuto.

Tutto ciò, però, sempre che sia valida l'ipotesi che il pittore greco abbia voluto rappresentare una scena che richiamasse episodi di vita vissuta e non che avesse un significato allegorico. Ma quale potrebbe essere questo significato? Ci sembra molto chiaro, quasi intuitivo: quello del transito dell'anima verso la vita ultraterrena, quello di un tuffo verso l'aldilà. E lo specchio dell'acqua rappresenta l'infinito del mare o la palude Stige, sulla riva della quale tristi le anime approdavano fuggendo il sole della vita terrena.

Quale delle due ipotesi accogliere? La compiuta e raccolta bellezza di questa lastra, il fascino del volo nello spazio di quel giovane corpo di adolescente, di un volo segnato sul bianco del fondo da duemilacinquecento anni circa e che sembra sia in ogni attimo lí lí per concludersi nel verde-azzurro del mare, la suggestione di una scena che ci giunge completamente nuova, tramandataci attraverso i secoli dall'arte greca, rendono piú difficile la risposta, anche se ci appare certamente piú congeniale allo spirito e al gusto dei Greci trascendere il contingente e rappresentare sotto forma simbolica l'eterno.

Quindi quel tuffo verso l'aldilà, questa poetica rappresentazione della morte, ha un valore universale; non è rappresentato il transito di questo o quell'uomo, tanto meno di colui le cui spoglie furono raccolte in questa tomba, ma il transito dell'Uomo, con valore assoluto.

Queste sono le cinque lastre affrescate da pittore greco che compongono la tomba del tuffatore, il rinvenimento della quale, in brevissimo volgere di tempo, è entrato nella storia dell'archeologia segnando di questa storia uno degli episodi piú sconvolgenti. Numerosi sono i problemi e gli interrogativi che queste pitture pongono e di alcuni abbiamo già fatto cenno, ma converrà enuclearne i piú importanti, che sono, mi sembra, i seguenti: 1) È realmente greca questa pittura, e in che consiste la sua grecità? 2) Quali riflessi ha nei confronti di quanto già conoscevamo dell'arte greca? Ci dice qualcosa di nuovo o di diverso? 3) L'ipotizzato rapporto tra pittura e ceramica greca, oggi che abbiamo anche il secondo termine di confronto, cioè la pittura, resta cosí stretto come si era sino a oggi affermato? 4) La pittura etrusca, posta ora per la prima volta a confronto con una pittura greca, appare come un'espressione artistica autonoma o subordinata? E la sua validità poetica ne esce esaltata o limitata? 5) La pittura cosiddetta lucana del quarto secolo a.C. è un fenomeno autonomo come si è creduto, o in un certo qual modo, deriva dalla pittura greca?

Ai cinque quesiti non possono ancora tener dietro altrettante categoriche risposte, perché l'assoluta novità del rinvenimento interessa o sconvolge tante verità sulle quali ci si era adagiati. È necessaria un po' di meditazione, è necessario, cioè, che il fatto nuovo sia lentamente assimilato. Purtuttavia a noi, cui la fortuna ha posto in mano questo esaltante rinvenimento, è dato anche l'obbligo di avanzare delle risposte, sia pure con alcune riserve. Del resto ci incoraggia la constatazione che nella maggior parte dei casi la prima intuizione che l'archeologo riceve all'atto del rinvenimento è la piú valida, è quella che risulterà giusta anche dopo lungo studio. Cerchiamo, quindi, molto rapidamente di rispondere.

L'organicità costruttiva, la coerenza compositiva, l'unità concettuale non solo sono espressioni proprie dell'arte greca, ma non espressioni che l'arte non greca di quella stessa età rifiuta in quanto non congeniali. È una pittura, pertanto, non solo greca, ma che, per di piú, non può essere non greca: si aggiunga che la purezza del disegno non trova riscontro se non nell'ambito stesso dell'arte greca. Del resto Paestum nell'età di questa pittura, cioè la prima metà del V secolo, è una delle maggiori città greche della Magna Grecia, e questa età coincide anche con il momento di maggiore splendore economico e culturale della città, con il momento in cui piú viva e assoluta è la grecità. Ponendola in tutto il tessuto dell'arte greca, noi constatiamo, come si è già accennato, che questa pittura presenta una problematica artistica che credevamo maturata in età successiva. Se ciò può spiegarsi con il fatto che la pittura anticipa ricerche e problematiche figurative rispetto alle altre forme d'arte, come per esempio la scultura, se ne deduce che i tempi dell'arte greca sono diversi da quelli finora puntualizzati, e che pertanto devono essere risottoposti a esame critico.

Prima del rinvenimento della tomba del tuffatore la ceramica dipinta era l'unica via attraverso la quale noi potevamo cercare di individuare atteggiamenti e problematica della perduta pittura greca, cosí che ogni storia della pittura greca era, in sostanza, una storia della ceramica figurata. Purtroppo, se noi confrontiamo le lastre della tomba del tuffatore con la coeva ceramica dipinta, dobbiamo constatare che ci troviamo di fronte a cose cosí diverse, cosí poco commensurabili, ovviamente per l'altezza maggiore del linguaggio poetico espresso dalle pitture, che dobbiamo forse rinunciare a comprendere, attraverso un confronto con la ceramica figurata, la vera essenza della pittura greca perduta.

Che la civiltà etrusca, in particolare la cultura artistica, debba moltissimo al mondo greco è un fatto accertato da tempo, per cui tante manifestazioni della scultura e della ceramica, che erano considerate puramente etrusche, si sono dimostrate col passare del tempo piú greche di quanto non si sospettasse. Tutta la cultura artistica etrusca ha ricevuto stimoli, suggerimenti e indirizzi dalla cultura greca, suggerimenti, in una parola, che il mondo etrusco ha ricevuto e rielaborato, adattandoli alla propria sensibilità. Ma poiché gran parte del sentimento e della sensibilità artistica greca non è prodotto che può essere esportato e, soprattutto, compreso e ricevuto da chi greco non è, tutti i motivi greci appaiono nell'arte etrusca poco compresi, riespressi in forma meno pura e, pertanto, entro certi limiti, piú etrusca. Pochi anni or sono, precisamente nel 1964, con la scoperta a Elea-Velia della Porta Rosa, il piú monumentale edificio greco di architettura civile, si è dimostrato che anche l'arco e la volta, comunemente considerati invenzione dell'arte etrusca, sono forme dell'architettura greca, cosí che l'Etruria e Roma sono debitrici al mondo greco anche di queste forme.

Sottratto alla cultura artistica etrusca il vanto della scoperta dell'arco e della volta, rimaneva la sola pittura ad attestare una autonomia della visione artistica etrusca, anche se era stato da piú parti affermato che queste pitture non potevano non derivare dalla pittura greca, per noi perduta; anzi, si era anche sospettato che alcune delle piú belle e compite pitture etrusche fossero opera di artista greco.

Ora che possediamo una pittura greca il discorso si fa piú semplice. Proprio per la presenza in questa pittura di molti particolari presenti anche in quella etrusca possiamo renderci conto che, anche per quanto riguarda la pittura, l'arte etrusca è debitrice verso quella greca, non solo, ma ripetendo o rielaborando suggerimenti greci, il pittore etrusco ha mostrato, piú di quanto non appaia in qualsiasi altra forma d'arte, i suoi limiti: vorremmo coraggiosamente dire che tutta la pittura etrusca esce dal confronto molto ridimensionata.

L'altro capitolo di pittura antica non greca a noi noto, quello relativo alla pittura lucana di quarto secolo a.C., riceve, invece, nuova luce: evitando un discorso particolareggiato, che sarebbe troppo lungo, crediamo si possa affermare che la pittura lucana, pur nei suoi limiti, pur nella sua « povertà barbarica », denuncia i suoi agganci con la pittura greca del quinto secolo: i pittori lucani hanno rivissuto a loro modo, nei limiti culturali della loro civiltà, la lezione greca, esprimendosi in forme disorganiche, risolte ingenuamente, ma realizzando, contemporaneamente, una non ancora ben definita funzione mediatrice tra l'arte greca e l'arte popolare.

Concludiamo questo articolo chiedendoci se Paestum o altra città greca ci restituirà ulteriori dipinti greci: non sappiamo, ma è in questa speranza, in questa ansia, che si rinnova e si esalta a ogni rinvenimento, che si racchiude il fascino della ricerca archeologica. Per cui, nel momento stesso in cui chiudiamo questa prima breve relazione, già ci prepariamo a riprendere lo scavo, in trepida, rinnovata attesa di ulteriori rinvenimenti.

La distruzione di cellule leucemiche di topi mediante un'unica iniezione di enzima L-asparaginasi è dimostrata in questa serie di microfotografie effettuate allo Sloan-Kettering Institute for Cancer Research. Nella microfotografia in alto vi è tessuto leucemico prelevato da un topo prima del trattamento: le formazioni rotondeggianti sono nuclei di cellule. Al centro, cellule leucemiche prelevate da un topo quattro ore dopo una iniezione: le macchie nere relativamente piccole sono cellule leucemiche morte. In basso, microfotografia scattata 17 ore dopo una iniezione: la maggior parte delle cellule leucemiche sono morte.

L-asparagina e leucemia

Le cellule di alcuni tipi di leucemia richiedono quantità supplementari dell'aminoacido L-asparagina: questo significa che sono sensibili al trattamento con l'enzima L-asparaginasi che distrugge l'aminoacido.

di Lloyd J. Old, Edward A. Boyse e H.A. Campbell

Il cancro è una sfida non solo in quanto minaccia la salute e la vita stessa, ma anche in quanto rappresenza un problema che coinvolge i processi fondamentali degli organismi viventi. Intensi sono stati gli sforzi per trovare sostanze capaci di distruggere selettivamente le cellule neoplastiche, e si sono scoperti composti che prolungano la sopravvivenza degli ammalati di cancro. Il punto debole di questi composti chemioterapici sta nel fatto che la loro azione letale non è limitata alle cellule tumorali, ma si estende, in misura variabile, anche a quelle normali. Pertanto il loro impiego è limitato dalla tossicità verso le cellule normali, specialmente se si tratta di cellule ad alto ritmo di moltiplicazione, come sono quelle dei tessuti che formano gli elementi figurati del sangue e quelle del rivestimento interno dell'intestino.

La ragione di questo relativo insuccesso è data dal fatto che non si era riusciti a scoprire una proprietà biochimica che distinguesse chiaramente una cellula cancerosa da una normale. Per anni i cancerologi hanno cercato di scoprire sostanze elaborate solo dalle cellule tumorali oppure sostanze che fossero necessarie solo a esse: queste sostanze avrebbero potuto offrire un punto d'attacco specifico contro le cellule neoplastiche.

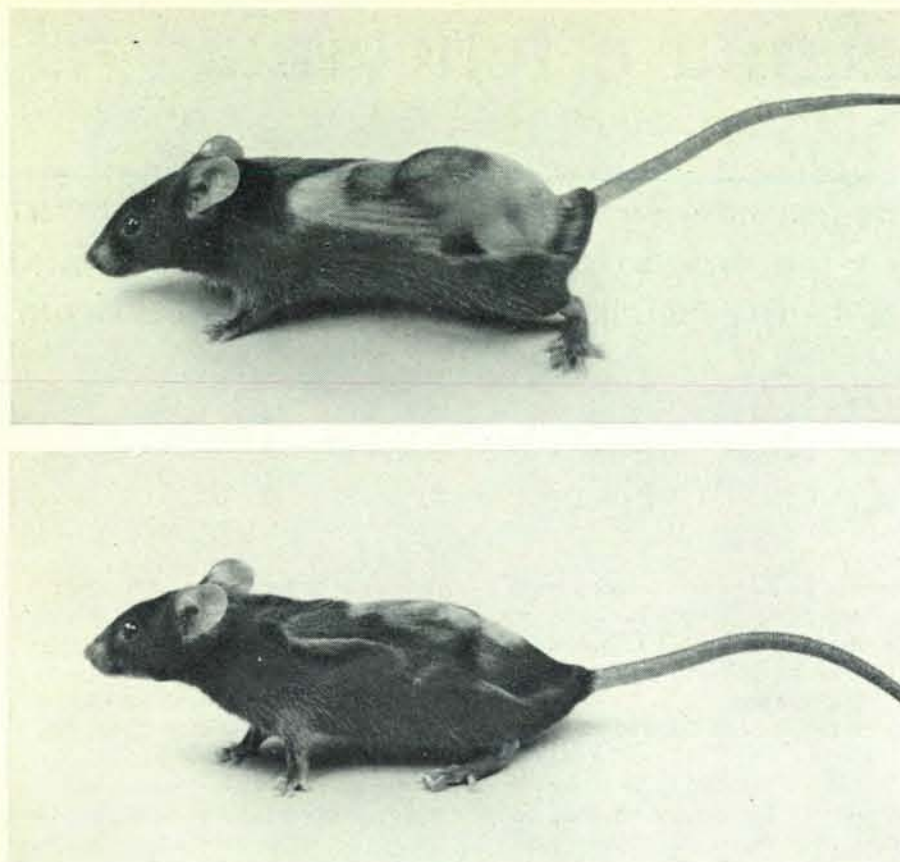
La dimostrazione che le cellule tumorali differiscono dalle normali sia nella struttura sia nel metabolismo va perciò considerata come uno degli sviluppi piú significativi di questi ultimi anni. La prova che esistono differenze di struttura è venuta da studi immunologici. Sostanze che non si trovano nelle cellule normali, e che immunologicamente sono classificabili come antigeni, sono state trovate nelle cellule tumorali: probabilmente questa è una caratteristica comune a tutti i tipi di tumori ai quali sono sensibili gli animali di laboratorio. Le ricerche in questo campo sono ora rivolte a sfruttare queste differenze antigeniche, con l'obiettivo finale di poter controllare il cancro mediante l'immunizzazione.

Le ricerche che passeremo in rassegna ora si riferiscono piú a differenze metaboliche che strutturali. Si supponeva da tempo che il metabolismo delle cellule neoplastiche fosse significativamente diverso da quello delle cellule normali, ma solo di recente questa diversità è diventata chiara. A conclusione di esperimenti intrapresi fin dal 1950 si sa ora che se alle cellule di certi tumori si sottrae l'asparagina (un aminoacido che le cellule normali possono sintetizzare da sé) le cellule cancerose muoiono. La scoperta di questo difetto metabolico e la dimostrazione che esso può venire sfruttato per il trattamento del cancro, sono uno dei punti basilari delle moderne ricerche cancerologiche. Racconteremo la storia di questa scoperta e ne illustreremo le possibili applicazioni cliniche.

Nel 1953 John G. Kidd, del Cornell University Medical College, riferí su alcuni esperimenti originali relativi alle risposte immunologiche al cancro. Si era chiesto se l'antisiero ottenuto da conigli immunizzati con trapianti di cellule leucemiche di topo inibisse la leucemia nei topi. A questo punto va precisato che, per ragioni di studio, le leucemie degli animali vengono trasmesse trapiantando le cellule leucemiche da un animale di laboratorio a un altro: in quest'ultimo esse continuano a proliferare, rendendo leucemico il nuovo ospite e fornendo cellule per trapianti successivi di leucemia. In genere ciò è possibile solo perché gli animali utilizzati in questo genere di studi sono stati per generazioni accoppiati tra loro fino a ottenere una condizione di uniformità genetica; gli animali sono come dei gemelli, hanno tessuti con identiche proprietà biologiche per cui non rigettano piú i trapianti provenienti da tessuti di animali del medesimo ceppo e di conseguenza ne accettano trapianti in serie di leucemie e di altri tumori.

Dopo il trapianto di una leucemia in un gruppo di topi, Kidd iniettò loro antisiero di coniglio e insieme siero ottenuto da cavie sane. Il siero di cavia è ricco di certe proteine, note come « complemento », che potenziano le difese immunitarie, cioè la produzione di anticorpi; il siero di cavie sane venne iniettato al fine di aumentare l'efficacia di qualsiasi anticorpo che fosse presente nel siero di coniglio.

Per controllo, Kidd iniettò il siero di cavia, e soltanto questo, ad altri topi leucemici. Con sorpresa constatò che la leucemia di questi topi regrediva e in qualche caso guariva definitivamente. Arrivò a stabilire tre importanti principi, relativi a quello che venne poi chiamato il « fenomeno di Kidd »: anzitutto dimostrò che il siero di cavia era l'unico ad avere tale effetto sulle leucemie (vedremo in seguito come questo principio abbia subito successivamente una precisazione): il siero di conigli, di cavalli e di uomini non produce alcuna risposta. In secondo luogo stabilí che il siero di cavia distruggeva solo le cellule leucemiche, lasciando inalterati i tessuti normali dei topi e senza perciò provocare effetti collaterali tossici. Terzo, trovò che il siero di cavia era attivo contro alcuni tipi di leucemia, ma non contro altri. Il gruppo delle leucemie non sensibili comprendeva tutte quelle trapiantate di recente, il che fece dapprima pensare che le leucemie sensibili erano solo quelle che avevano una lunga storia di trapianti.

Non molto tempo dopo la scoperta di Kidd, Thomas A. McCoy e i suoi colleghi della Samuel Roberts Noble Foundation ad Ardmore nell'Oklahoma,

Un topo, la cui tumefazione sul dorso è un trapianto leucemico (*sopra*), ha ricevuto una unica iniezione di L-asparaginasi. Dopo 7 giorni (*in basso*) la tumefazione è scomparsa.

pubblicarono i risultati di uno studio nutrizionale su cellule di tumori animali coltivate in laboratorio. Fra le altre osservazioni, McCoy e collaboratori notarono che le colture di certe cellule di tumore di ratto venivano prima o poi a morte, a meno che non fosse loro fornita L-asparagina. Questo aminoacido fu tra quelli isolati per primi dai pionieri della biochimica, nel XIX secolo; il prefisso *L* indica che nella forma tridimensionale è levogiro. Benché l'asparagina sia un costituente delle proteine, gli studi dimostrarono che non è uno degli aminoacidi essenziali per una dieta adeguata degli animali: si concluse pertanto che le normali cellule animali possono sintetizzare l'asparagina loro occorrente. In realtà molte altre ricerche sul fabbisogno di aminoacidi che hanno le cellule coltivate in laboratorio, non hanno mai dimostrato una fase di vita cellulare in vitro in cui fosse necessario aggiungere L-asparagina al mezzo di coltura.

A suo tempo non furono in molti a dare importanza alle scoperte di Kidd e di McCoy, né parve esserci tra loro un rapporto. Pur considerando valida l'opera di Kidd, l'impressione prevalente era che i risultati potessero in qualche modo dipendere dalla circostanza che si trattava di trapianti ripetuti diverse volte in molti animali di laboratorio: poiché le leucemie che in quegli esperimenti rispondevano al siero di cavia erano state trapiantate numerose volte, potevano essere diventate immunologicamente incompatibili con i topi ospiti in cui erano trapiantate. Le leucemie trapiantate di fresco, per le quali l'incompatibilità non era sospettabile, non avevano infatti risposto al siero. Perciò si concluse che il fenomeno di Kidd, quantunque affascinante, interessava più la biologia dei trapianti che il cancro.

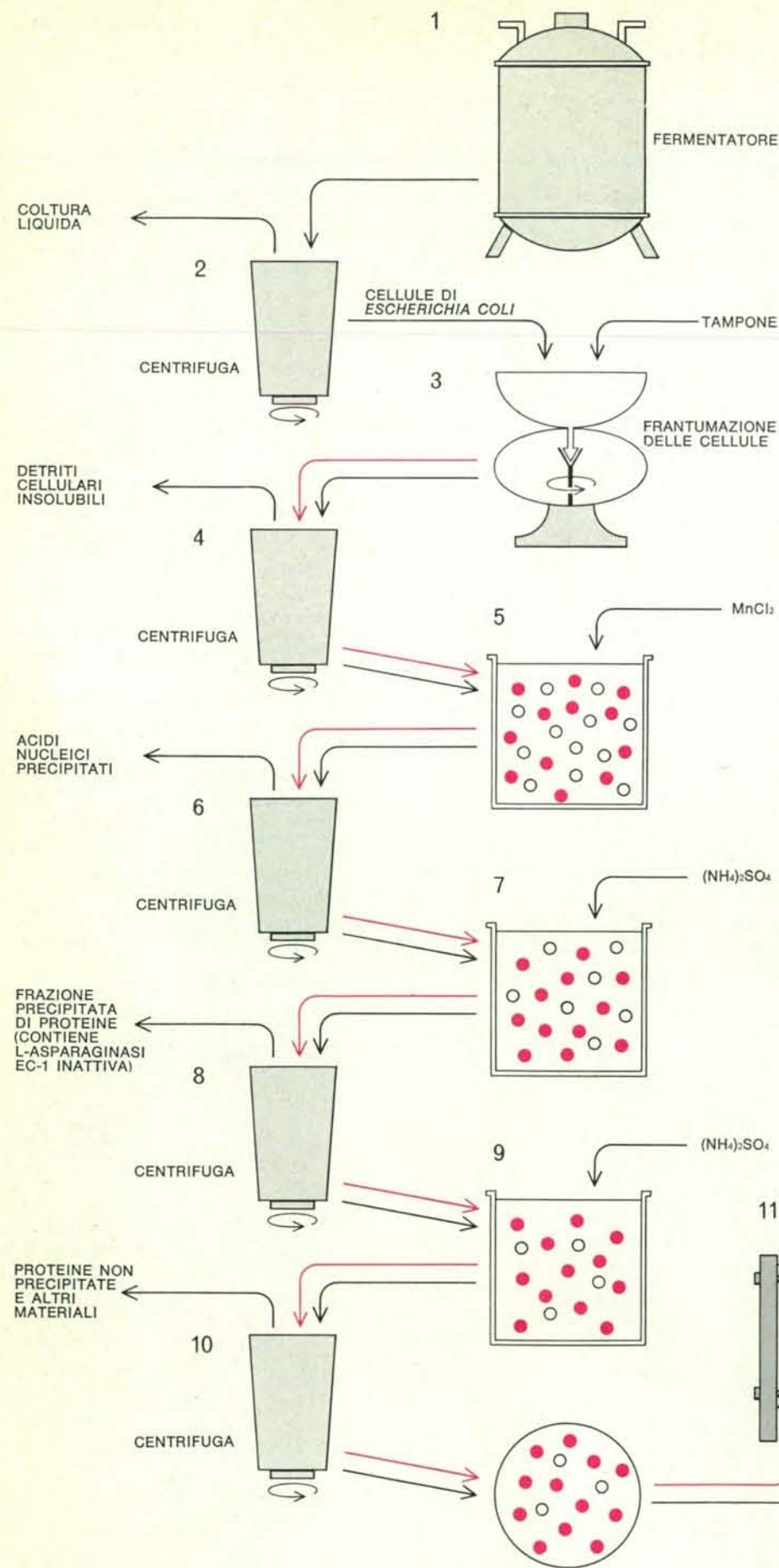
Passarono parecchi anni prima che le due scoperte, apparentemente slegate, si dimostrassero come due facce della stessa moneta. John D. Broome, allora al Cornell University Medical College, si convinse che i risultati di Kidd non potevano essere attribuiti a un rigetto immunologico. Studiando le differenze non immunologiche tra siero di cavia e sieri di altri animali, Broome trovò che nel 1920 A. Clementi, un ricercatore dell'Università di Roma, aveva scoperto che il sangue di cavia contiene un enzima che distrugge l'asparagina, enzima che era assente nel sangue di numerosi altri animali. Broome cominciò allora una serie di esperimenti la cui inequivocabile conclusione fu che l'enzima del siero di cavia, detto asparaginasi, doveva essere considerato il fattore antileucemico responsabile del fenomeno di Kidd.

La forza delle conclusioni di Broome stava nel portare dei dati che derivavano da due approcci sperimentali indipendenti. Trapiantando la leucemia con la metodica di Kidd, dimostrò per prima cosa che la proprietà antileucemica del siero di cavia non poteva essere distinta dall'attività asparaginasica: i molti e differenti metodi fisici e chimici da lui impiegati indicavano trattarsi di un'unica e identica sostanza. Con altri esperimenti dimostrò che questo tipo di leucemia, per poter crescere in coltura, richiedeva un supplemento di L-asparagina: se le cellule non potevano disporre di asparagina morivano quasi tutte entro pochi giorni, anche se quelle che sopravvivevano potevano essere mantenute in coltura per parecchie settimane, essendo in grado di vivere senza asparagina. Quando le cellule sopravvissute alla privazione di asparagina venivano trapiantate ancora una volta in un topo, non erano più sensibili al siero di cavia.

L'importante scoperta di Broome sul fenomeno di Kidd, pubblicata su « Nature » nel 1961, non ricevette un immediato e largo riconoscimento; ancora oggi in articoli che trattano della biochimica dei tumori spesso non se ne fa menzione o ci si limita appena a citarla. Succede che risultati più importanti non vengano riconosciuti, perché vanno contro la corrente delle idee comuni: in questo caso dell'idea che non esiste una netta distinzione tra cellule cancerose e cellule normali.

Dal 1961 il nostro gruppo allo Sloan-Kettering Institute for Cancer Research ha studiato più di cento nuove leucemie trapiantate in topi. Questo lavoro ha avuto come primo scopo quello di definire la struttura antigenica di queste leucemie in rapporto al loro agente causale. È stata fatta maggior luce sul fenomeno di Kidd e si è potuto capire perché solo le leucemie che avevano subito molti trapianti erano sensibili al siero di cavia. Anzitutto si poté stabilire che la dipendenza dall'asparagina è un carattere comune di alcuni tipi di leucemia dei topi e che non è in rapporto con il numero di trapianti fatti per determinate leucemie. C'è una classe di leucemie dei topi che di rado presenta dipendenza dall'asparagina: sono le leucemie provocate dai noti virus della leucemia dei topi. Le leucemie di cui Kidd si servì per studiare l'effetto del siero di cavia sui nuovi trapianti derivavano da ceppi di topi portatori di virus leucemici, predisposti quindi a questo tipo di tumore. Si tratta di leucemie che si possono provocare con maggiore facilità, ma appartengono, come ora abbiamo visto, ad una classe non sensibile alla privazione di asparagina. A questo punto la questione che si presentò era: la sensibilità all'asparaginasi è una peculiarità di alcune leucemie di roditori o è caratteristica delle neoplasie di parecchie specie? Prima di poter dare una risposta, dovevamo poter disporre di una sorgente di asparaginasi più ricca di quella rappresentata dal siero di cavia. La cavia appartiene a una superfamiglia di Roditori sudamericani, i Cavioidei, la quale comprende il capibara (il più grosso di tutti i Roditori), la lepre della Patagonia, il paca e l'aguti (tutti di dimensioni maggiori della cavia). I sieri di numerosi Roditori sudamericani sono stati studiati da noi e da Nelson D. Holmquist della Louisiana State University School of Medicine. Una attività L-asparaginasica è stata ritrovata nel siero di tutti i membri della superfamiglia dei Cavioidei: come era da attendersi, la presenza di L-asparaginasi conferisce a questi sieri la capacità di distruggere le leucemie che rispondono al

SOTTORDINE	SUPERFAMIGLIA	FAMIGLIA	ANIMALE STUDIATO	L-ASPARAGINASI (UNITÀ PER MILLILITRO DI SIERO)
ISTRICOMORFI PORCOSPINI DEL VECCHIO E DEL NUOVO MONDO; ALTRI RODITORI	CINCILLOIDEI	CINCILLIDI	CINCILLÀ	0
	ERETIZONTOIDEI	ERETIZONTIDI	COENDU	0
	OCTODONTOIDEI	MIOCASTORIDI	COIPU	0
	CAVIOIDEI	CUNICULIDI	PACA	60
			AGUTI	600
		CAVIDI	CAVIA	100
			CONIGLIO DELLA PATAGONIA	100
		IDROCHERIDI	CAPIBARA	30

I Roditori sudamericani del sottordine degli Istricomorfi comprendono cinque animali, nel cui sangue c'è l'enzima L-asparaginasi. Non tutti i Roditori del gruppo hanno tale caratteristica; l'enzima non si trova nel cincillà, nel coendu e nel coipu.

siero di cavia. Nel siero dell'aguti l'enzima era sei volte piú abbondante che nel siero di cavia. Il siero di animali parenti piú lontani della cavia – membri di altre superfamiglie dello stesso sottordine – non contiene invece asparaginasi, prova questa che la presenza dell'enzima nel sangue è un carattere filogenetico che risale al periodo anteriore alla diversificazione evolutiva dei Cavioidei.

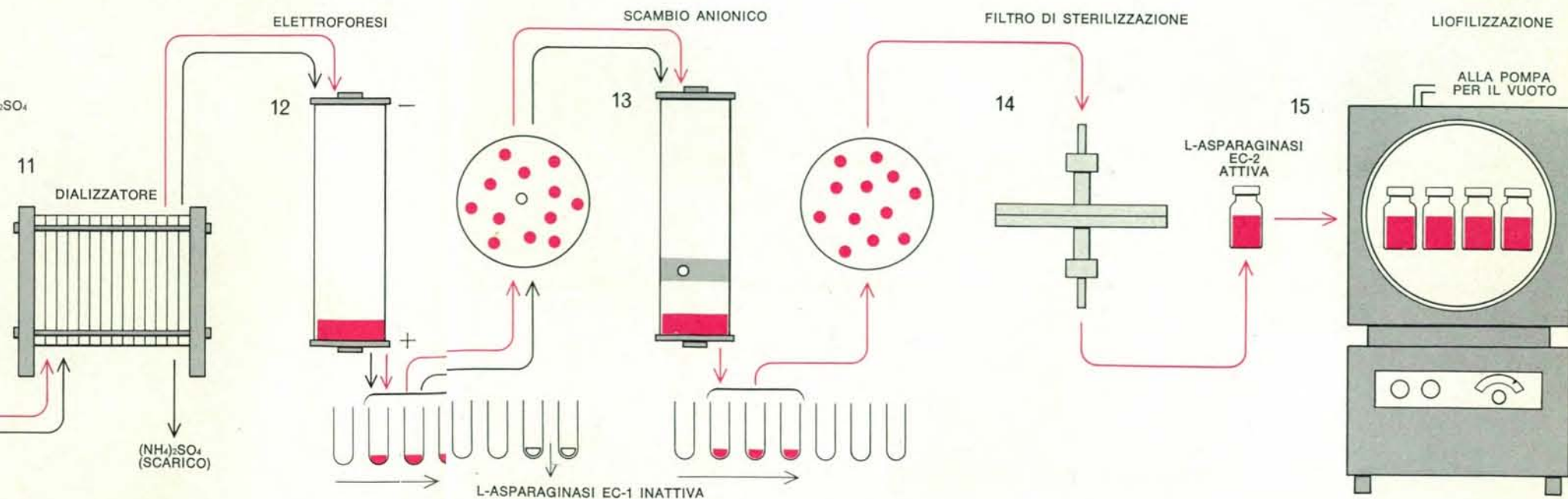
L'asparaginasi è stata trovata in molte cellule di animali e di piante: i Cavioidei sono diversi perché sono gli unici nei quali l'enzima venga liberato dalle cellule e circoli nel siero di sangue. Sembrava che il problema della asparaginasi potesse essere risolto estraendola da microrganismi, ma i primi tentativi in questo senso non ebbero successo. Per un certo tempo parve che l'aguti potesse essere la fonte piú agevole di grosse quantità di enzima. In effetti nel 1965 un paziente venne trattato con siero di aguti da un gruppo di medici dall'Università di Recife, in Brasile. Poi Louise T. Mashburn e John C. Wriston Jr., dell'Università del Delaware, trovarono che un'asparaginasi efficace contro la leucemia dei topi poteva essere estratta dal comune bacillo intestinale, l'*Escherichia coli.* Questo bacillo può essere coltivato in quantità massive e perciò potrebbe rappresentare una fonte praticamente inesauribile di enzima.

Le varie asparaginasi estratte da differenti organismi non sono tutte eguali per struttura e proprietà, benché siano tutte in grado di distruggere l'asparagina. Possiamo perciò renderci conto ora come non tutte siano egualmente efficaci nel sopprimere le leucemie: alcune vengono inattivate troppo rapidamente dall'organismo animale, in altri casi le condizioni organiche possono essere sfavorevoli per l'attività enzimatica, e cosí via. Per esempio, l'asparaginasi estratta dalle cellule di lievito non è attiva contro la leucemia dei topi. L'*Escherichia coli* produce due forme di enzima, una sola delle quali (la EC-2) ha attività antileucemica, mentre la forma inattiva (EC-1) viene eliminata con un processo di estrazione a piú stadi (*si veda l'illustrazione in queste due pagine*).

Pertanto il fattore limitante non era piú la disponibilità di asparaginasi, bensí la sua estrazione e purificazione: gli estratti batterici non purificati sono altamente tossici. Joseph D. Teller della Worthington Biochemical Corporation aveva lavorato sui metodi per preparare grandi quantità di asparaginasi da *Escherichia coli* e nel 1966 fu in grado di isolarne abbastanza per provarlo nel trattamento del linfosarcoma dei cani. Scegliemmo i cani perché appartengono ad un ordine di Mammiferi (i Carnivori) la cui notevole lontananza da quello dei Roditori può essere considerata una significativa prova della estensione nelle varie specie animali di tumori asparagino-dipendenti, di forme tumorali cioè che per vivere e svilupparsi hanno bisogno di asparagina. Per di piú i cani hanno un'elevata frequenza di linfosarcoma, il quale ricorda alcuni tipi di tumori dell'uomo. Nei nostri primi esperimenti (condotti in collaborazione con Robert S. Brodey e I.J. Fidler, della School of Veterinary Medicine dell'Università della Pennsylvania) scegliemmo tre cani in cui la malattia era in uno stato di avanzato sviluppo: linfoghiandole e tonsille erano molto tumefatte e gli animali erano quasi incapaci di mangiare e di muoversi.

I risultati del trattamento con asparaginasi furono sorprendenti: nel giro di una settimana le iniezioni di enzima fecero tornare due dei cani in condizioni di apparente benessere, mentre il terzo ebbe un notevole miglioramento. Da rilevare come possano essere distrutte quantità elevate di tessuto tumorale, con conseguente liberazione di prodotti di scissione, senza che si producano fenomeni tossici. Continuando a essere relativamente scarsa l'asparaginasi, non eravamo in grado di provare gli effetti di dosi massive o di periodi piú lunghi di trattamento. Nei cani il linfosarcoma ricomparve tra il 7° e il 50° giorno successivo alla sospensione delle iniezioni. Disponevamo di asparaginasi sufficiente per un secondo ciclo di trattamento in uno solo degli animali: anche questa volta la risposta fu ugualmente positiva.

Con la conferma che l'asparaginasi era efficace contro tumori di animali cosí distanti tra loro come lo sono i topi e i cani, si faceva strada la speranza che la mancanza di asparagina si dimostrasse efficace nel distruggere alcune forme di cancro nell'uomo. Studi clinici iniziati lo scorso anno allo Sloan-Kettering Institute e al Wadley Institute of Molecular Biology a Dallas hanno dimostrato che un tipo di leucemia umana, la forma linfoblastica acuta, presenta spesso il difetto metabolico che rende le cellule neoplastiche vulnerabili all'asparaginasi: le leucemie che colpiscono i bambini sono generalmente di questo tipo. A giudicare sia dai test di laboratorio con cellule coltivate sia dalla risposta dei malati al trattamento, la maggior parte delle leucemie dei bambini sono asparagino-dipendenti. Finora proprio queste leucemie sono state le piú intensamente studiate, ma vi è la speranza che anche altri tipi di leucemia e altri tumori dell'uomo possano rispondere all'asparaginasi.

Il grado di miglioramento che può essere raggiunto con la terapia asparaginasica, pur limitatamente alla leucemia di tipo linfoblastico acuto, è ancora sconosciuto. Benché l'enzima provochi evidenti modificazioni della malattia fino alla scomparsa per periodi di tempo variabili, non è l'unica sostanza a ottenere risultati del genere: anche alcuni ormoni della corteccia surrenale e sostanze che interferiscono con la sintesi dell'acido nucleico provocano remissioni simili. La differenza tra l'asparaginasi e altri agenti sta nel fatto che l'enzima colpisce solo le cellule maligne, mentre le altre sostanze che abbiamo citato non sono selettive nella loro azione. Data la specificità di azione dell'asparaginasi, ne deriva che il paziente non soffrirà di disturbi collaterali dovuti all'enzima per se stesso (potrà però soffrire disturbi provocati invece dai contaminanti tossici per difetto di purifica-

La L-asparaginasi può essere ottenuta dai batteri di *Escherichia coli* meglio che da animali, grazie al processo qui descritto. I batteri vengono anzitutto messi a coltura in un fermentatore (*1*); tolto il liquido dalla coltura (*2*) le cellule batteriche vengono frantumate (*3*). Poi viene asportato tutto il materiale che non sia L-asparaginasi EC-2 con procedimenti (*da 4 a 14*), che comprendono frazionamento salino, elettroforesi, scambio ionico e filtrazione. Alla fine l'enzima viene conservato liofilizzato.

Terrier Boston con linfoghiandole del collo massivamente ingrossate (il collo è rasato). Dopo effettuata la fotografia il cane è stato trattato con l'enzima L-asparaginasi.

Dopo 10 giorni di trattamento, condotto da W.D. Hardy Jr. dello Sloan-Kettering Institute for Cancer Research, il cane era tornato in condizioni di apparente benessere.

zione). Finora la disponibilità di asparaginasi pura è stata troppo limitata anche per consentire una determinazione della quantità che può essere somministrata senza incidenti a un uomo; può darsi che il dosaggio ottimale sia molto piú alto della quantità finora usata per i trattamenti sperimentali. Probabilmente le quantità di asparaginasi per uso clinico rimarranno scarse ancora per parecchio tempo. (In molti laboratori degli Stati Uniti, del Giappone e dell'Europa si sta studiando il modo di produrre alti quantitativi di L-asparaginasi, a basso costo e ad alto grado di purezza, da colture di *Escherichia coli*. Il riserbo di cui si circondano i ricercatori, che pur lavorano intensamente per raggiungere l'importante obbiettivo, è comprensibile. Siamo però in grado di affermare che una grossa industria chimico-farmaceutica tedesca non è molto lontana dalla messa a punto di un impianto pilota per la produzione di L-aparaginasi da colture di *Escherichia coli*.) Per tale motivo è desiderabile disporre di test da impiegare prima del trattamento dei pazienti e che possano stabilire in anticipo se un determinato tumore è asparagino-dipendente. Vi sono parecchi test di laboratorio possibili; le cellule asparagino-dipendenti delle leucemie dei topi e dei linfosarcomi dei cani possono morire cosí rapidamente (entro le 24 ore) quando sono coltivate senza asparagina, che questo solo carattere può bastare a distinguere in questi animali le leucemie richiedenti asparagina. Però con questo semplice test le colture di cellule di leucemia umana non danno risultati cosí netti; nemmeno la mancanza di proliferazione di cellule tumorali in assenza di asparagina è un test adeguato nell'uomo, come invece lo è per alcune leucemie trapiantate nei topi. Il motivo di ciò è che la maggior parte dei tumori primitivi nell'uomo e negli animali non si moltiplica allo stesso modo in coltura.

Siamo ricorsi allora a un altro test (applicato per la prima volta nei topi da L.H. Sobin e da Kidd) che misura la risposta alla mancanza di asparagina di cellule tumorali in coltura. Si basa sul fatto che le cellule viventi operano in continuazione la sintesi di proteine e di acido nucleico. A tal fine colture di cellule tumorali, alcune in presenza di asparagina e altre invece senza, vengono incubate con precursori radiomarcati di proteine o di acido nucleico. Se la coltura senza asparagina non presenta una sensibile incorporazione dei precursori radiomarcati nelle proteine e nell'acido nucleico di nuova sintesi, concludiamo che il tumore è asparagino-dipendente. Con le leucemie dei topi il test indica nel breve periodo di trenta minuti se le cellule neoplastiche siano o no soggette a distruzione con l'asparaginasi. È un test che ora viene largamente applicato nella determinazione del bisogno di asparagina da parte di cellule di tumori umani.

Parecchi interrogativi attendono però ancora una risposta. Quali tipi di tumori dell'uomo, oltre alla leucemia, risponderanno alla asparaginasi? Altri tipi di neoplasie richiedenti asparagina sono note nei ratti e nei cani, e si spera che lo stesso valga anche per l'uomo. Un'importante questione teorica è *perché* alcune cellule hanno bisogno che gli venga fornita asparagina dall'esterno: richiedono forse piú asparagina di quanta ne possano sintetizzare? o hanno perso la capacità di sintetizzare l'aminoacido? Ricerche condotte in numerosi laboratori indicano come valida quest'ultima ipotesi. Risulta che le cellule asparagino-dipendenti mancano di un enzima, l'asparagino-sintetasi, che nelle cellule normali (e in quelle tumorali che non rispondono all'asparaginasi) trasforma l'acido aspartico in asparagina. Il fenomeno è paragonabile a quanto si osserva in microrganismi in cui una mutazione abbia provocato la perdita di un enzima o la produzione di un altro che prima non c'era, col risultato di rendere assolutamente necessario l'apporto di una sostanza che in condizioni normali verrebbe invece sintetizzata.

Il comportamento dei tumori può far supporre che le cellule maligne tornino a uno stadio primitivo di minore dipendenza da situazioni esterne: si ha questa impressione constatando come un tumore attecchisca su un organismo che si trovi in scadenti condizioni generali. Cosí è particolarmente interessante constatare che alcune cellule cancerose, anziché raggiungere l'indipendenza metabolica, perdono la capacità di svolgere una funzione della quale i normali tessuti sono capaci.

La scoperta della dipendenza dall'asparagina come proprietà di certi tumori fa sperare che possa aver finalmente fine il pessimismo generato da anni di ricerche biochimiche che non avevano assolutamente rivelato alcuna differenza che potesse aprire una strada a terapie anticancerose specifiche. Certamente vi è la possibilità che vengano alla luce altre specifiche esigenze nutrizionali di cellule neoplastiche e si possano compiere altri tentativi validi nel trattamento dei tumori. Possiamo anche sperare che il difetto nel metabolismo dell'asparagina non resti l'unico esempio di questo tipo.

Stelle a contatto

Una stella su mille è in realtà una coppia di stelle tanto vicine che tra le loro atmosfere avvengono scambi di materia. Dallo studio di queste stelle si possono ottenere dati sull'evoluzione del sistema solare.

di O. J. Eggen

Se qualcuno fosse in grado di condurre degli esperimenti sulle stelle, le istruzioni per un esperimento fondamentale potrebbero cominciare cosí: « Prendete due stelle, mettetele a contatto e... ». Per fortuna degli astronomi questo esperimento è eseguito dalla stessa natura. Parecchie stelle binarie, cioè coppie di stelle che ruotano attorno a un centro di gravità comune, sono tanto vicine l'una all'altra da trovarsi addirittura a contatto, con le rispettive atmosfere che si allungano l'una verso l'altra fino a mescolarsi. Sembra proprio che la natura prediliga questo esperimento, al punto che circa una stella su mille risulta essere una coppia di « stelle a contatto ». Le coppie a contatto hanno molto da dirci sull'origine e sull'evoluzione delle stelle, fenomeni che debbono essere compresi prima che si possa spiegare l'origine delle galassie e dell'universo nel suo insieme.

Le coppie di stelle a contatto furono scoperte 185 anni or sono da un certo John Goodricke dello Yorkshire. (La sua scoperta è tanto piú degna di nota in quanto egli aveva solo 18 anni e per di piú era sordomuto.) Goodricke aveva osservato che le stelle β *Persei* e β *Lyrae* mostravano variazioni ritmiche di luminosità. Algol, come viene anche chiamata la stella Beta della costellazione di Perseo, compiva un ciclo completo in due giorni e venti ore; il periodo di β *Lyrae* era di 13 giorni. Benché a quei tempi la legge di gravitazione di Newton non fosse stata ancora sperimentata al di là del sistema solare, Goodricke congetturò senz'altro che si dovesse trattare di stelle doppie e che la variazione della luminosità risultasse dal fatto che ognuna delle due stelle veniva alternativamente eclissata dall'altra. (Per la sua scoperta e per la spiegazione del fenomeno Goodricke ebbe la medaglia Copley e fu eletto membro della Royal Society, ma morí due settimane dopo l'elezione.)

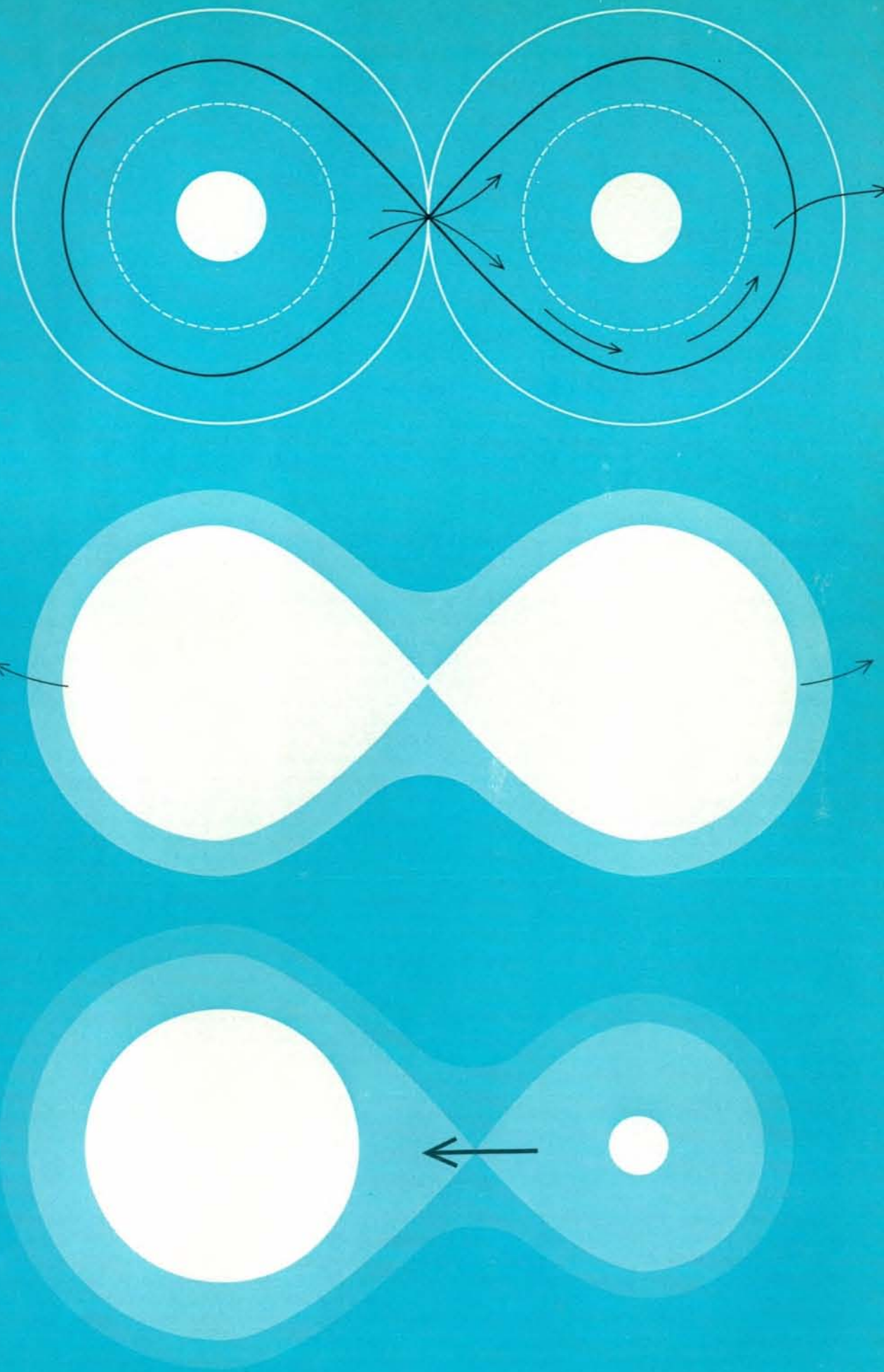
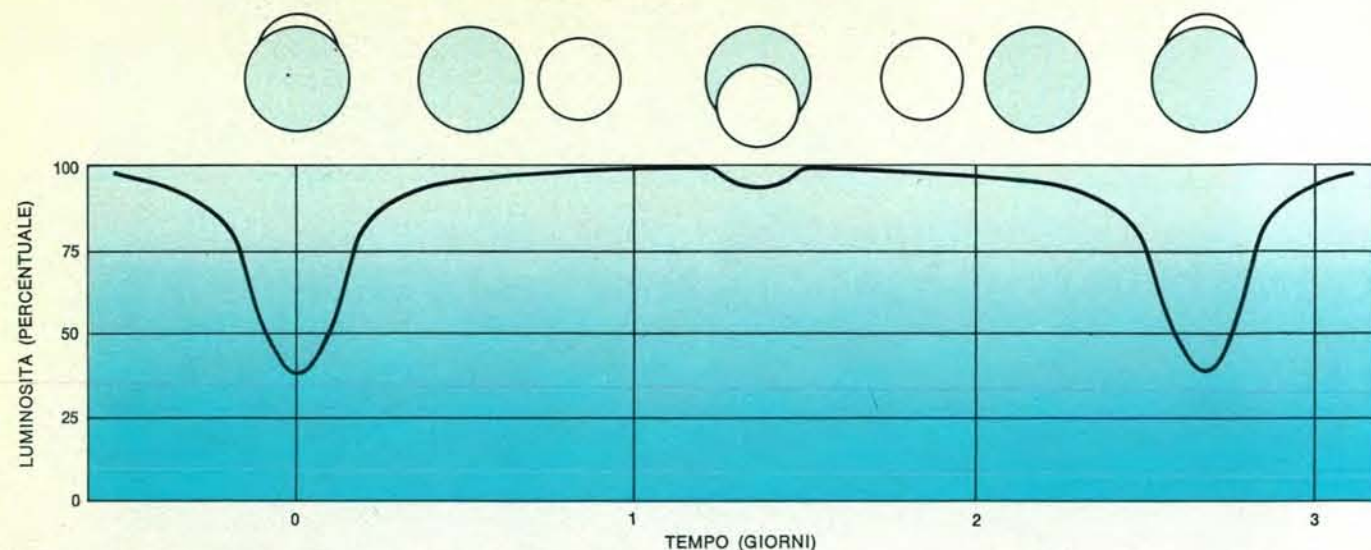
Le variazioni osservate da Goodricke e la spiegazione fisica che egli ne dette sono mostrate nelle illustrazioni alle pagine 30 e 31. Nel caso di β *Persei*, una delle due stelle è molto piú luminosa dell'altra, per cui le eclissi differiscono molto a causa della diversa quantità di luce che viene alternativamente occultata. Come è ovvio, la luminosità è massima e costante quando tutte e due le stelle sono completamente visibili, mentre diminuisce quando una di esse viene eclissata dall'altra.

Nel caso di β *Lyrae*, Goodricke era meno sicuro della sua spiegazione, e non vedeva esattamente come potesse applicarsi. Del resto, ci si può render conto delle sue difficoltà osservando l'illustrazione a pagina 31.

Le due stelle sono infatti talmente vicine da provocare enormi fenomeni reciproci di marea in seguito ai quali finiscono con l'assumere la forma di palloni da rugby con gli assi piú lunghi puntati l'uno in direzione dell'altro. Durante la rotazione lungo le loro orbite, la configurazione della coppia di stelle si mantiene, per cosí dire, naso a naso, e, vista dalla Terra, sembra variare in modo alquanto complicato.

Di sistemi tipo β *Lyrae* oggi se ne conoscono a centinaia; pochi, però, hanno periodi di 13 giorni e anzi, nella maggior parte dei casi, il periodo è piú breve di un giorno e può anche durare meno di un quarto di giorno. Anche oggi non possiamo fare molto di piú di quanto fece Goodricke, ossia osservare tali sistemi e descrivere i processi fisici che vi si svolgono; possiamo tuttavia sperare di comprendere le ragioni che inducono la natura a condurre l'esperimento se ci poniamo nel contesto dell'evoluzione stellare.

In breve, la teoria della evoluzione stellare è la seguente: una stella nasce da una condensazione di gas, per lo piú idrogeno, che, a causa della compressione provocata dalla forza di gravità, si riscalda fino a che la temperatura raggiunge il valore al quale l'idrogeno comincia a « bruciare » per reazione termonucleare. Riportando su un diagramma la luminosità delle singole stelle durante questa loro lunga fase « adulta » e le rispettive temperature superficiali, si trova che le stelle risultano distribuite lungo la ben nota curva detta sequenza principale (*si veda l'illustrazione a pag. 32*). Dopo un tempo abbastanza lungo la stella avrà consumato buona parte del suo idrogeno, e comincerà allora a subire una serie di trasformazioni relativamente rapide. Ricomincia allora nel nucleo centrale una contrazione dovuta alla gravità, con conseguente aumento di temperatura. Ma l'aumento di temperatura nel nucleo centrale provoca l'espansione degli strati esterni, e cosí la stella si ingrandisce, quantunque il suo nucleo vada

Nella pagina a fronte sono mostrati tre sistemi di stelle a contatto che probabilmente rappresentano altrettanti momenti di uno stesso processo evolutivo. Y *Cygni* (*in alto*) è un sistema giovane: nessuna delle due stelle è deformata dal campo gravitazionale dell'altra. Col passare del tempo le periferie delle due stelle si espanderanno e giungerebbero a toccarsi (*cerchi grandi pieni*) fra tre milioni di anni circa se non ci fosse il limite gravitazionale indicato dalla curva nera a forma di otto. Gli effetti gravitazionali e gli scambi di materia attraverso la strozzatura della figura a otto distorcono lentamente le due stelle, e si forma un sistema tipo AO *Cassiopeiae* (*al centro*). Il terzo momento dell'evoluzione può essere costituito da sistemi tipo V444 *Cygni* (*in basso*).

Il sistema a contatto noto come Algol o β *Persei* è costituito da due stelle orbitanti attorno a un comune centro di gravità. Le due stelle si eclissano periodicamente a vicenda, per cui la luce proveniente da questo sistema che può essere raccolta dalla Terra è continuamente variabile. Una delle due stelle è meno luminosa dell'altra, e quindi le due eclissi differiscono nettamente.

Le due stelle di β *Lyrae*, deformate a causa delle mutue azioni gravitazionali, sembrano due palloni da rugby allineati. Il sistema è in rotazione e la sua luminosità appare, sulla Terra, continuamente variabile; l'oscuramento varierà a seconda delle posizioni relative delle due stelle: sarà massimo quando la meno luminosa (*in colore*) eclissa la più luminosa.

contraendosi. Essa si discosta a questo punto dalla sequenza principale per diventare una gigante rossa. Quando poi il suo combustibile nucleare si è completamente consumato, la stella subisce un'ulteriore contrazione diventando quel corpo estremamente denso noto col nome di « nana bianca ».

Oltre alla teoria dell'evoluzione stellare, inesistente al tempo di Goodricke, oggi siamo in possesso di buone stime della grandezza, della massa e della luminosità di molte stelle. Sappiamo per esempio che, in una stella della sequenza principale, grandezza, massa, temperatura e luminosità sono fattori strettamente dipendenti l'uno dall'altro. Si può vedere, per esempio, dalla stessa illustrazione, che una stella cento volte piú luminosa del Sole ha, rispetto a esso, una massa tripla, una temperatura di circa 7000 °K piú alta, un raggio circa doppio. Una stella la cui luminosità sia 1000 volte quella del Sole ha una massa cinque volte piú grande, una temperatura di 13 000 °K superiore e un raggio due volte e mezzo maggiore.

Le coppie di stelle a contatto dovrebbero costituire una prova dell'esattezza di queste cifre. Se potessimo mettere il nostro Sole a contatto con una stella a esso simile – senza tener conto, per il momento, degli effetti di marea che ognuna delle due stelle provocherebbe sull'altra – i due astri girerebbero l'uno attorno all'altro in un periodo di tempo di poco inferiore a un quarto di giorno. Per stelle piú luminose, e quindi piú grandi, occorrerebbe un tempo piú lungo, mentre per stelle piú piccole del Sole basterebbe meno di un quarto di giorno. Dato che grandezza e temperatura di una stella sono collegate in modo univoco, si può prevedere che esista una relazione tra il periodo di rotazione e le temperature delle coppie di stelle a contatto.

Bisogna però prendere in considerazione, per cominciare, gli effetti della gravitazione. Due stelle a contatto esercitano fra loro forze di attrazione che, essendo le stelle essenzialmente costituite da grandi masse di gas, produrranno fenomeni molto simili alle maree generate dalla Luna e dal Sole sulla Terra. Il problema di tali deformazioni fu risolto in modo generale 25 anni or sono da Subrahmanyan Chandrasekhar dell'Università di Chicago. Due stelle a contatto causano l'una nell'altra delle deformazioni, che possono produrre un allungamento del 20 % circa del loro raggio nel punto di contatto e un appiattimento equivalente dei poli (*si veda l'illustrazione in alto a pagina 33*).

Si possono ora costruire due relazioni ipotetiche tra periodo e temperatura: una per stelle non deformate, e l'altra per stelle deformate (*si veda l'illustrazione in basso a pagina 33*). Tali relazioni possono quindi essere confrontate con le temperature e i periodi osservati per tutte le coppie di stelle a contatto esistenti entro una distanza di circa 300 anni luce dal Sole. Il controllo dà risultati piú positivi di quelli che in genere si ottengono con oggetti cosí grandi e distanti come le stelle. Per quanto vi siano delle divergenze tra i periodi delle coppie di stelle a contatto osservati a una data temperatura, tali divergenze restano nei limiti della curva di previsione per le stelle deformate. L'accordo tra osservazione e previsione conferma che si ha a che fare con coppie di stelle a contatto.

La distribuzione delle temperature e dei periodi delle coppie reali di stelle a contatto suggerisce non solo che la nostra conoscenza delle grandezze delle stelle della sequenza principale e le nostre teorie sulle maree stellari sono corrette, ma anche qualcosa di piú. Come si può vedere nell'illustrazione in basso a pagina 33, i punti sperimentali relativi alle coppie a contatto osservate sono molto prossimi alla curva periodo-temperatura prevista fino a periodi di circa la metà di un giorno. Da questo punto, e tanto maggiormente quanto piú aumenta il periodo, i punti cadono al di sotto della curva. Inoltre non esistono sistemi del genere i cui periodi siano piú lunghi di due terzi di giorno. L'interruzione ai due terzi e l'assenza di sistemi con periodi piú corti di un quarto di giorno potranno dirci qualcosa di utile sull'evoluzione delle stelle.

L'argomento ci costringe ad andare piú a fondo nella storia dell'evoluzione stellare. La relazione tra temperatura e raggio delle stelle, illustrata a pagina 32 (cioè la relazione sulla quale è basata la curva periodo-temperatura di cui abbiamo parlato) si applica solo alle stelle che non abbiano cominciato a evolvere fuori della sequenza principale. Consideriamo una stella che abbia iniziato tale evoluzione. Mentre nel nucleo della stella l'idrogeno si va consumando, si genera piú energia di quanta possa venire irradiata dalla superficie della stella. Questa comincia allora a espandersi, e la sua temperatura superficiale diminuisce. Le stelle piú grandi, con masse maggiori e che pertanto sono piú luminose, bruciano idrogeno a un ritmo prodigioso. Esse sono le prime a mostrare l'espansione provocata dall'eccesso di energia generato nel nucleo. Il ritmo con cui l'idrogeno viene consumato diminuisce regolarmente con la luminosità. Nel caso di una stella relativamente piccola, come il Sole, fortunatamente per la vita sulla Terra, il processo si svolge molto piú lentamente.

Una stella 10 000 volte piú luminosa del Sole raddoppierà il suo raggio in 10 milioni di anni, si espanderà fino a una grandezza 1000 volte maggiore di quella originale nei 25 milioni di anni successivi, ma, nel frattempo, la sua temperatura superficiale diminuirà di più di 10 000 °K. Stelle meno pretenziose godono di vita piú lunga con espansioni minori. Per quanto riguarda il Sole, vecchio già di quattro miliardi e mezzo di anni, si ingrandirà soltanto di una frazione della sua grandezza nei prossimi due miliardi di anni, e la sua temperatura diminuirà di meno di 1000 °K. Tenendo presente tutti questi dati sull'evoluzione stellare, possiamo cercare di chiarire l'enigma rappresentato da tre differenti sistemi di stelle binarie a eclisse: Y *Cygni*, AO *Cassiopeiae*, e V444 *Cygni*. (Le stelle di una costellazione sono identificate per mezzo di lettere greche e romane o con numeri arabi; alla lettera o al numero si fa seguire il genitivo latino del nome della costellazione, cosicché la stella Y della costellazione del Cigno diventa Y *Cygni*.) Il periodo di rotazione dei tre sistemi è di quattro giorni, ma la variazione di luminosità è nettamente differente da un sistema all'altro. Tutti e tre i sistemi hanno stelle piú o meno della stessa temperatura (30 000 °K circa), con luminosità 100 000 volte circa quella del Sole.

Y *Cygni* può essere considerato un sistema modello: le due stelle che lo costituiscono sono quasi uguali, e sufficientemente distanti perché la loro sfericità non venga alterata dalle forze di attrazione reciproca (*si veda l'illustrazione in alto a pagina 34*). La curva di luce è regolare, in quanto la sola variazione che vi si riscontra è dovuta all'alternarsi delle eclissi, che sono uguali per ambedue le stelle. (La durata delle eclissi costituisce la base per il calcolo delle grandezze relative delle stelle.)

Tuttavia, da quanto sappiamo sull'evoluzione stellare, un sistema del genere non può durare a lungo. Tra un milione di anni appena, le due stelle avranno le dimensioni indicate in figura dai due cerchi tratteggiati e, se l'evoluzione potesse continuare con lo stesso ritmo, fra tre milioni di anni esse saranno grandi come i cerchi continui, che sono proprio a contatto.

In realtà è impossibile che le due stelle raggiungano questa grandezza, perché c'è una superficie, detta superficie a velocità zero, che rappresenta un limite nel campo di forza gravitazionale che circonda le due stelle. Questa superficie, o meglio la sua sezione a forma di otto, è indicata in nero nella stessa figura. Le grandezze relative dei due lobi della figura a otto dipendono dal rapporto fra le masse delle due stelle, e il lobo piú grande sta attorno alla stella di massa maggiore. L'espansione delle stelle non può continuare al di là della superficie a velocità zero perché, quando il sistema si trova in queste condizioni, il cammino di resistenza minima per ogni particella di materia delle due stelle non è piú diretto verso l'esterno della stella, ma lungo la superficie a velocità zero e attraverso la strozzatura che separa le due stelle.

Dato che il ritmo di evoluzione è direttamente collegato alla massa delle stelle, la componente di Y *Cygni* a massa leggermente superiore perverrà prima dell'altra alla superficie di velocità zero, e ogni ulteriore tendenza all'espansione provocherà un passaggio di materia nel lobo attorno alla stella di massa minore. Le due stelle, quanto a massa, differiscono di poco, e perciò pure di poco differiscono i loro ritmi di espansione. Potranno passare allora poche migliaia di anni prima che sia raggiunto uno stato di equilibrio, e durante questo periodo la materia verrà pompata avanti e indietro continuamente da un lobo all'altro.

Oltre a quello che attraversa la strozzatura della figura a otto, ci sono altri due cammini di resistenza minima alle estremità opposte della figura, attraverso i quali, quasi certamente, una certa quantità di materia verrà pompata fuori del sistema. La maggior parte della materia espulsa rimarrà nelle vicinanze delle stelle, avviluppandole in un guscio sottile. L'oggetto che ne risulta assomiglia a un uovo con due tuorli: si tratta di una stella con due nuclei separati che « bruciano » dentro una stessa atmosfera.

Se questa previsione dell'evoluzione di Y *Cygni* nel corso dei prossimi due milioni di anni è esatta, le variazioni della sua luce saranno molto differenti da quelle che si osservano ora. Le eclissi oggi cosí ben definite e uguali, con luce costante tra l'una e l'altra, saranno scomparse, e al loro posto subentrerà una sorgente di luce non sferica e dall'aspetto continuamente variabile. Poi-

ché probabilmente ci sarà un flusso di gas da una stella all'altra, si potranno rilevare piccoli cambiamenti del sistema dalle variazioni della sua luminosità.

È abbastanza interessante notare che questa descrizione si addice abbastanza bene ad AO *Cassiopeiae* e a sistemi analoghi. La trasformazione descritta per sistemi tipo Y *Cygni* deriva in modo cosí completo dalla teoria dell'evoluzione stellare che se non esistessero sistemi come AO *Cassiopeiae*, bisognerebbe trovare qualche buona spiegazione per la loro assenza. Inoltre, poiché un sistema tipo Y *Cygni* può trasformarsi in un sistema tipo AO *Cassiopeiae* solo in un paio di milioni di anni, è logico attendersi che i sistemi tipo Y *Cygni* siano rari, mentre comuni siano quelli tipo AO *Cassiopeiae*; e questo è proprio ciò che si osserva sperimentalmente.

La previsione dell'evoluzione successiva di un sistema che abbia già raggiunto lo stadio di AO *Cassiopeiae* è piú difficile che non quella dell'evoluzione di un sistema tipo Y *Cygni*. Non è piú possibile sfruttare quanto è già noto circa l'evoluzione di una stella singola, a causa delle azioni reciproche tra le due componenti del sistema. Tali azioni provocano il travaso di nuova materia, ricca di idrogeno, dall'atmosfera dell'una in quella dell'altra stella e, dato che ciò si verifica solo per i sistemi binari, le conoscenze acquisite nello studio di altre stelle non sono in questo caso piú applicabili.

Un metodo di procedere consiste nel cercare sistemi che abbiano massa totale, temperatura e periodo uguali a quelli di Y *Cygni* e AO *Cassiopeiae*, ma variazioni di luce nettamente differenti. V444 *Cygni* è per l'appunto un sistema di questo tipo. La sua variazione di luce mostra, come Y *Cygni*, eclissi ben definite e simmetriche ma molto diverse in larghezza perché le stelle hanno grandezze molto differenti. Benché la massa totale sia di 35 unità solari, come per Y *Cygni* e AO *Cassiopeiae*, il rapporto tra le masse delle componenti è di 25 a 10, mentre in Y *Cygni* e AO *Cassiopeiae* la distribuzione della massa totale tra le componenti è molto piú equilibrata.

La sequenza principale per il Sole (*in basso a destra*) e altre stelle « adulte » rivela una stretta relazione fra grandezza, massa, temperatura e luminosità, quest'ultima relativa al Sole. I cerchi piú grandi sopra la curva rappresentano ciò che accade dopo che le stelle hanno consumato il loro combustibile. Dalla sequenza principale si possono ricavare curve periodo-temperatura nell'ipotesi che queste stelle siano a contatto con altre simili. Le curve sono mostrate nella figura in basso nella pagina a fronte.

Per effetto della gravità le due stelle a contatto si deformano gradualmente e si provocano a vicenda fenomeni di marea. I raggi normali (*a sinistra*) si allungano di circa il 20 % nel punto di contatto, mentre i poli si appiattiscono, e quindi si verifica un notevole cambiamento di forma (*a destra*). I centri delle due stelle si allontanano tra loro e il periodo di rotazione attorno al centro di gravità aumenta del 25 %.

Per quanto riguarda la luce, la somiglianza tra V444 *Cygni* e Y *Cygni* si limita solamente alla forma della variazione. I sistemi V444 *Cygni* e AO *Cassiopeiae* hanno in comune le variazioni irregolari di luce tra un ciclo e l'altro, dovute, in entrambi i casi, alla presenza di un'atmosfera comune e all'afflusso di correnti gassose all'interno dei sistemi.

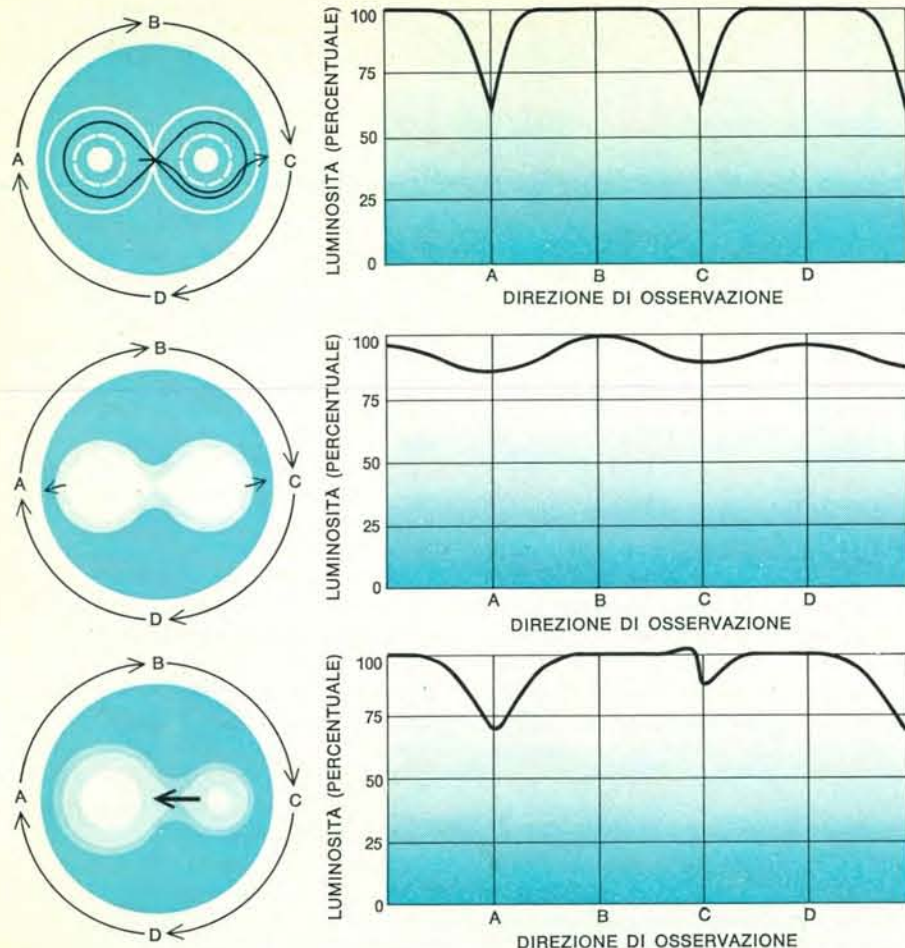
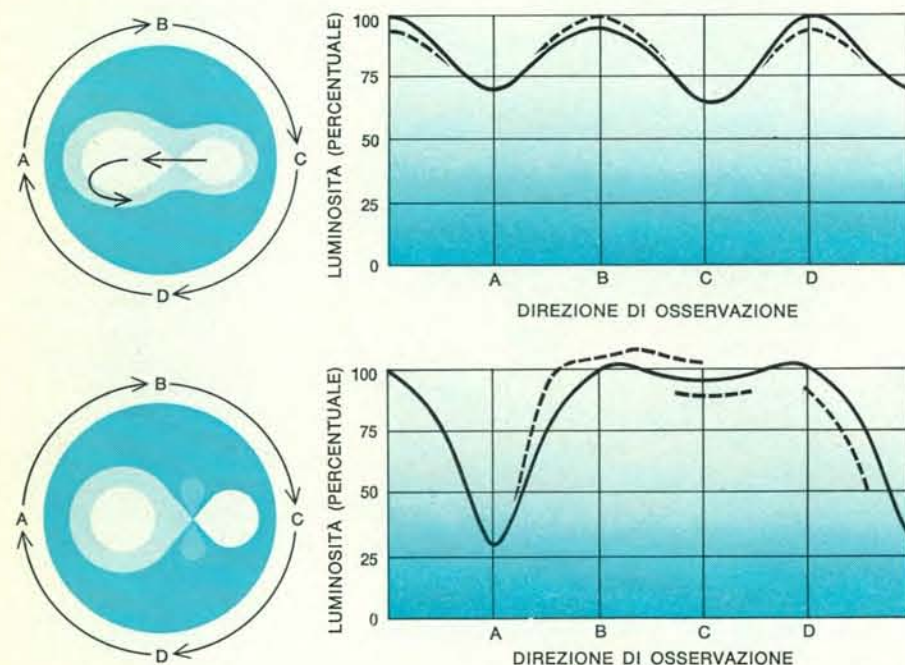
È prematuro asserire che i sistemi tipo V444 *Cygni* rappresentano lo stadio ultimo dell'evoluzione dei sistemi AO *Cassiopeiae*, perché gli attuali metodi di determinazione dell'età dei sistemi stellari sono ancora abbastanza rudimentali. Non si è ancora in grado, infatti, di calcolare accuratamente quanti milioni di anni separano gli stadi di sviluppo rappresentati da Y *Cygni*, AO *Cassiopeiae* e V444 *Cygni*. Il problema della successiva evoluzione di sistemi tipo AO *Cassiopeiae* è considerato di grande importanza, e si sta compiendo al riguardo molto lavoro teorico e osservativo.

Come risulta evidente dalla curva periodo-temperatura (*si veda la figura in basso in questa pagina*) le stelle doppie con periodi piú corti di due terzi di giorno sono molto piú numerose dei sistemi a grandi masse tipo AO *Cassiopeiae*. Il grande intervallo fra questi due tipi di sistema nel diagramma periodo-temperatura suggerisce che essi possono avere in comune soltanto una cosa: il tipo di contatto tra le stelle componenti. Come ho mostrato, vi sono buone ragioni per supporre che i sistemi AO *Cassiopeiae* si siano sviluppati dai sistemi Y *Cygni*. I sistemi a breve periodo rappresentano anch'essi uno stadio di sviluppo da una forma precedente di stelle doppie? In base all'evoluzione stellare la risposta è probabilmente negativa. Si sa che tra i sistemi a breve periodo molti hanno una età di pochi milioni di anni solamente. In tali periodi di tempo, per stelle cosí giovani, con masse di tre unità solari e anche meno, saranno avvenute espansioni molto piccole, e è quindi probabile che i sistemi a breve periodo siano nati nella loro forma presente.

Ma com'è successo che circa una stella su mille sia nata con due nuclei? Una possibilità ovvia è che in ciascun caso vi sia stata la scissione di una singola stella. Questa risposta fu accettata 50 anni or sono, principalmente come risultato del considerevole lavoro svolto al riguardo dall'astrofisico inglese James Jeans, le cui ricerche svilupparono idee precedentemente formulate dai matematici Karl Jacobi, tedesco, Henri Poincaré, francese, e George Darwin, inglese.

L'idea fondamentale era che una sfera rotante, perturbata in modo opportuno, può trasformarsi in una figura a forma di pera, che finisce con lo spezzarsi. Jeans osserva che « le masse sono dapprima proiettate l'una fuori dall'altra a velocità considerevoli, ma sembra probabile che poi arrivino a stabilizzarsi, descrivendo orbite regolari l'una attorno all'altra ». Per parecchi anni questo concetto rimase quasi ignorato dagli astronomi e dagli astrofisici; una ragione fu che, per amore di semplificazione, si era supposto che la figura a forma di pera fosse formata da un liquido incomprimibile, che non è certo lo stato in cui la materia si trova nelle stelle. Inoltre, la maggior parte delle indagini sulle figure « piriformi » altro non erano che pure esercitazioni matematiche, senza alcun riferimento alle stelle reali.

L'interesse per la teoria della scissione applicata a stelle vere è stato recentemente ravvivato dal lavoro di due giovani astrofisici inglesi, Ian W. Roxburgh del Queen Mary College e Leon Lucy della Columbia University. Per riassumere i risultati da essi ottenuti oc-

Relazione periodo-temperatura (prevista) per stelle a contatto nel caso di sistemi deformati (*curva continua*) e non deformati (*curva tratteggiata*). I cerchietti pieni rappresentano coppie realmente esistenti in un raggio di 300 anni luce dal Sole, e forniscono una verifica della curva; gli altri indicano sistemi di massa piú grande come AO *Cassiopeiae*.

Variazioni di luminosità di Y *Cygni*, AO *Cassiopeiae* e V444 *Cygni* riferite a un intero ciclo. I punti da *A* a *D* indicano le varie direzioni secondo cui questi sistemi vengono visti dalla Terra; per maggiore semplicità sono rappresentati come se l'osservatore si muovesse attorno al sistema. Ogni sistema ha un periodo di rotazione di quattro giorni.

Si pensa che i sistemi a contatto a breve periodo con massa uguale o inferiore a quattro volte quella del Sole risultino da instabilità di rotazione di una stella a forma di pera, che può condurre a una scissione della stella stessa. In alto è rappresentato un modello di sistema di questo genere poco dopo la sua nascita, con la variazione di luminosità che esso mostrerebbe. In basso sono rappresentate le caratteristiche del sistema V *Sagittae*, che potrebbe rappresentare l'evoluzione di un sistema di stelle a contatto a breve periodo.

corre prendere in considerazione l'evoluzione stellare anteriore alla sequenza principale, prendere cioè in considerazione l'evoluzione verso la curva della sequenza principale invece che partendo da essa, come nel caso delle stelle giganti rosse. Una stella in via di evoluzione verso la sequenza principale va contraendosi. Come per l'espansione, anche il ritmo di contrazione è direttamente correlato alla massa della stella, ma la contrazione ha luogo in un tempo molto inferiore.

Se la stella ruota mentre si contrae, può essere sollecitata in modo tale che la massa si spezzi e formi una coppia di stelle a contatto. Questa teoria suscita un grande interesse specialmente perché essa spiega due fenomeni visibili nella curva periodo-temperatura riprodotta in basso nella pagina precedente: l'assenza di stelle doppie con periodi piú corti di un quarto di giorno, e l'improvvisa scomparsa delle stesse coppie a breve periodo vicino ai due terzi di un giorno. La mancanza del primo gruppo si spiega col fatto che le stelle in via di contrazione e con masse inferiori a circa l'80 % della massa del Sole non producono le instabilità necessarie per provocare la scissione. La scomparsa ai due terzi di giorno si spiega invece col fatto che, se la scissione avviene in una stella che va contraendosi e con una massa quattro volte circa quella del Sole, il risultato non è una coppia di stelle a contatto, bensí un sistema di stelle nettamente separate, cosí come si può vedere nel sistema Y *Cygni*.

La sezione longitudinale di una tipica coppia di stelle a contatto risultante da scissione è mostrata nella figura in basso in questa pagina, insieme con la forma della variazione di luce osservata. Il periodo è la metà di un giorno, la massa totale quattro volte quella del Sole, e la temperatura circa 8000 °K. Un problema non risolto è come mai la forma del sistema e le variazioni di luce rassomigliano alla forma e alle variazioni di AO *Cassiopeiae*, che è piú calda e di massa maggiore. La spiegazione sembra risiedere nel fatto che i sistemi AO *Cassiopeiae* divennero stelle a contatto, mentre le stelle a contatto a corto periodo furono tali sin dalla loro nascita.

Comunque, tutti e due i sistemi contengono stelle a contatto. È difficile prevedere gli sviluppi futuri di questi sistemi che rimarranno al di fuori del filone principale dell'evoluzione stellare a causa del fenomeno del contatto. La scala dei tempi è troppo lunga perché si possa seguire lo sviluppo di ogni singolo sistema, e pertanto bisognerà considerare sistemi diversi, sparsi in un periodo di tempo compreso fra 10 e 100 milioni di anni.

Per sistemi a corto periodo la binaria a contatto dell'illustrazione in basso nella pagina a fronte rappresenta l'inizio. Per ciò che viene dopo, il problema è simile a quello che riguarda i sistemi AO *Cassiopeiae* e V444 *Cygni*: l'incertezza nella determinazione dell'età di ciascuno dei due sistemi rende impossibile asserire con certezza che l'uno si trasformi nell'altro. Esiste tuttavia un tipo di sistema che sembra possedere i requisiti per rappresentare il secondo stadio delle stelle doppie a corto periodo. Un esempio di questo è V *Sagittae*.

I sistemi V *Sagittae*, come il primo stadio delle stelle a contatto a breve periodo, hanno un periodo che è circa metà di un giorno, e una massa totale di circa quattro masse solari. Il confronto tra le forme delle stelle in questione e le variazioni di luce osservate nei due tipi di sistemi risulta incomprensibilmente analogo in quasi ogni dettaglio a quello compiuto tra AO *Cassiopeiae* e V444 *Cygni*. Se si potesse dimostrare che i sistemi a breve periodo e relativamente semplici, illustrati nella figura in basso della pagina a fronte, si trasformano nei complessi sistemi V *Sagittae*, ciò basterebbe da solo a dar credito alla supposizione che i complessi sistemi V444 discendano dai sistemi AO *Cassiopeiae*.

Ma vi sono ancora altre difficoltà per risolvere il problema dell'evoluzione delle stelle doppie. Si può prevedere che il terzo e ultimo stadio dell'evoluzione produca una nana bianca, ossia l'ultima fase, secondo la teoria della evoluzione stellare, di ogni stella. Previsioni teoriche, sulle quali non vi sono motivi di dubbio, indicano che prima di arrivare a questa fine, la stella deve ridurre la sua massa a poco piú di quella del Sole.

Molte stelle con masse eccessive smaltiscono questo eccesso esplodendo in modo spettacolare, divenendo cioè *novae*. Può darsi che i sistemi V *Sagittae* siano la dimostrazione di questa fase finale dell'evoluzione. Vi sono buoni motivi per credere che le componenti di questi sistemi stiano procedendo rapidamente verso lo stadio di nane bianche. In questi sistemi avvengono già esplosioni minori, preludio alla deflagrazione finale.

Lo studio approfondito delle coppie di stelle a contatto promette perciò di ricompensarci in vari modi: può fornirci le conferme sperimentali di determinate ipotesi della teoria dell'evoluzione stellare e colmarne anche importanti lacune.

L'aerodinamica del boomerang

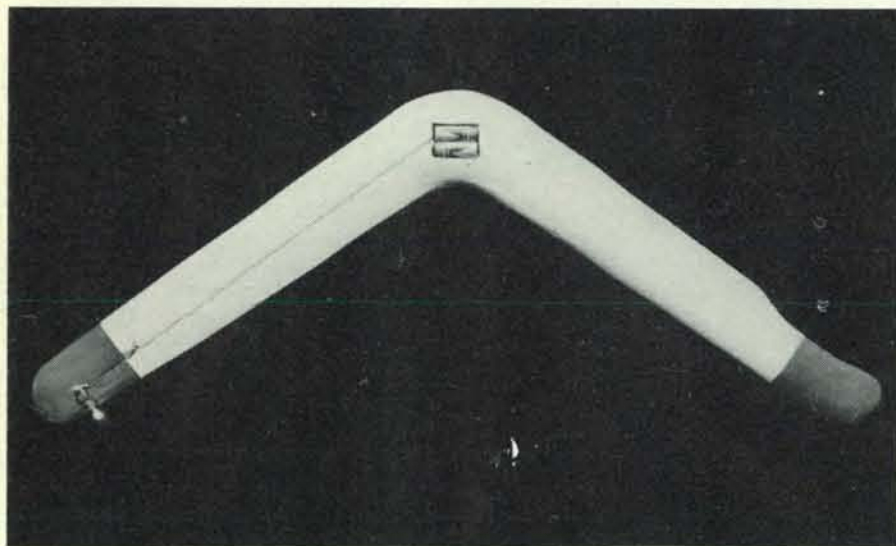
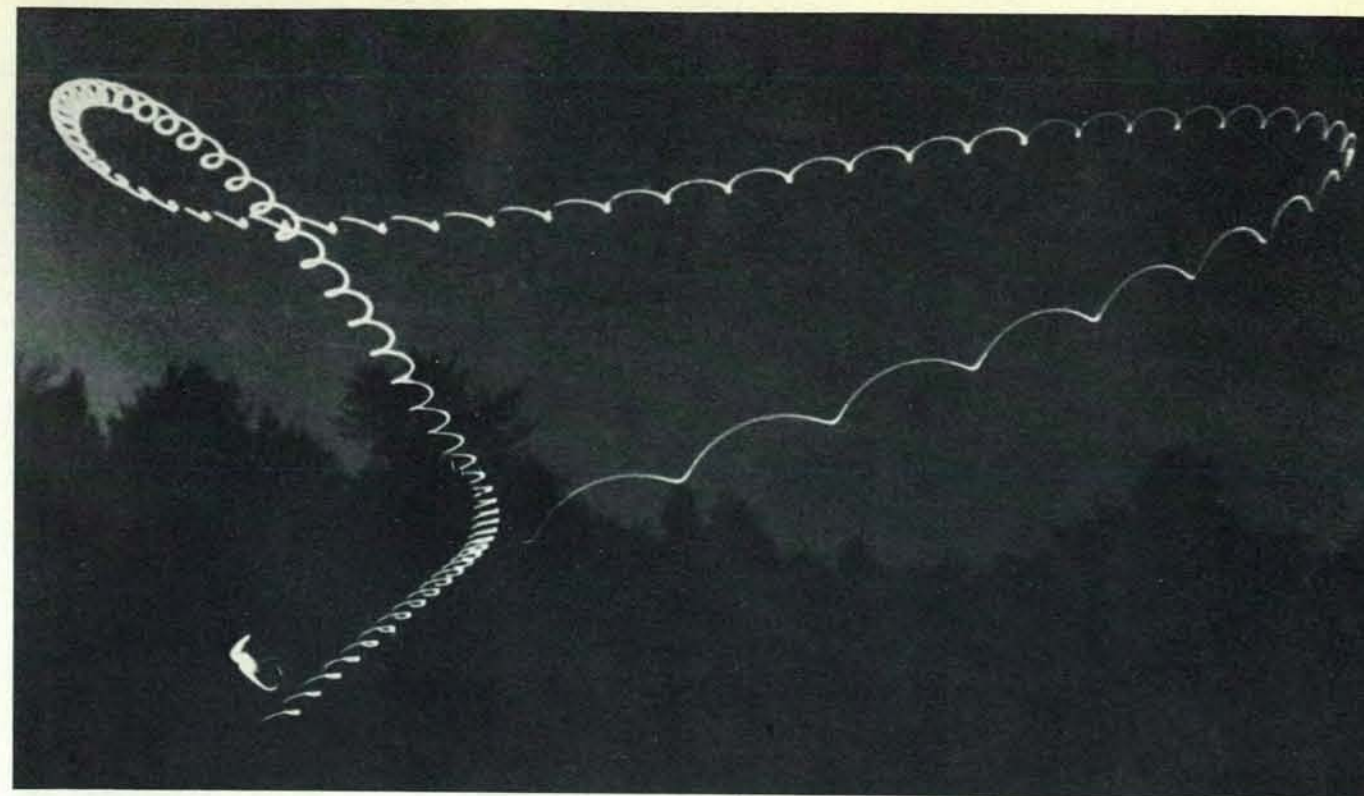
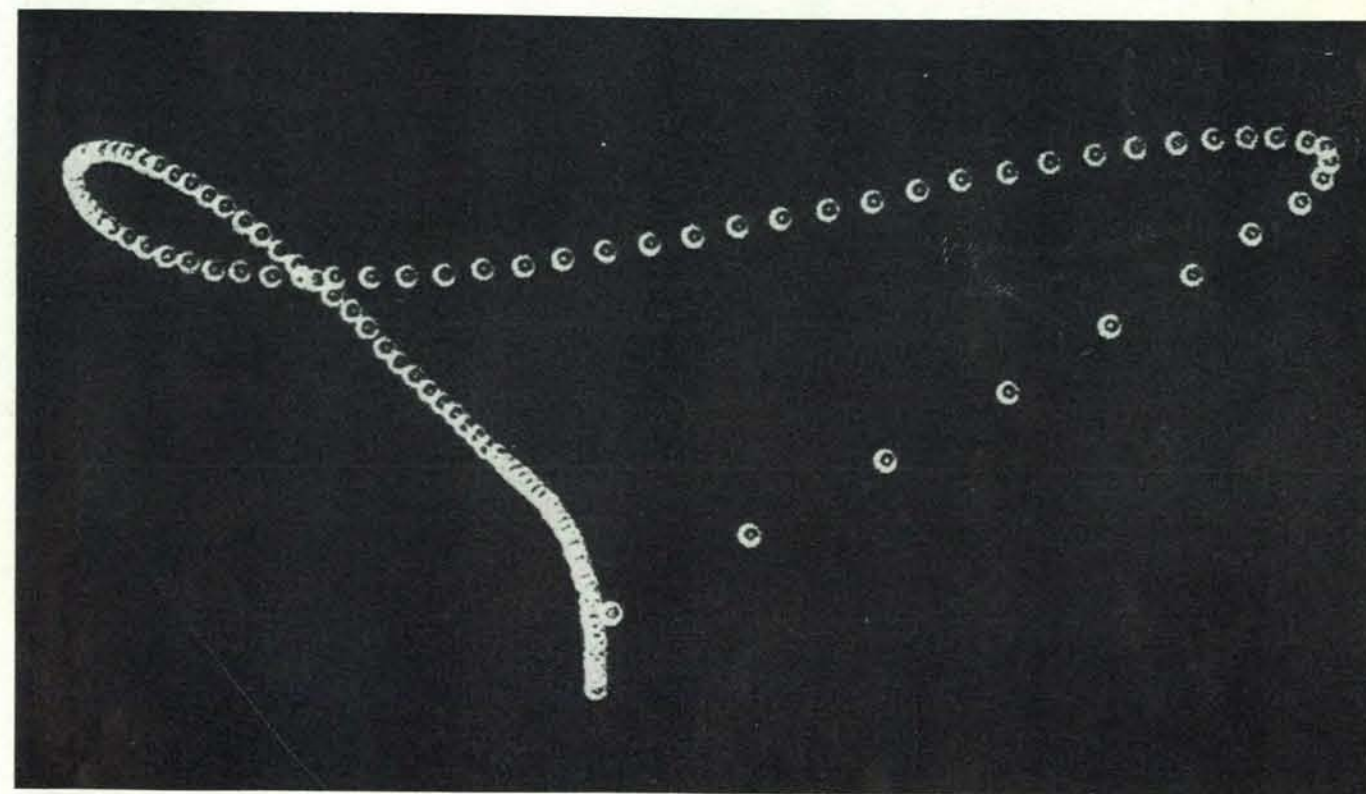
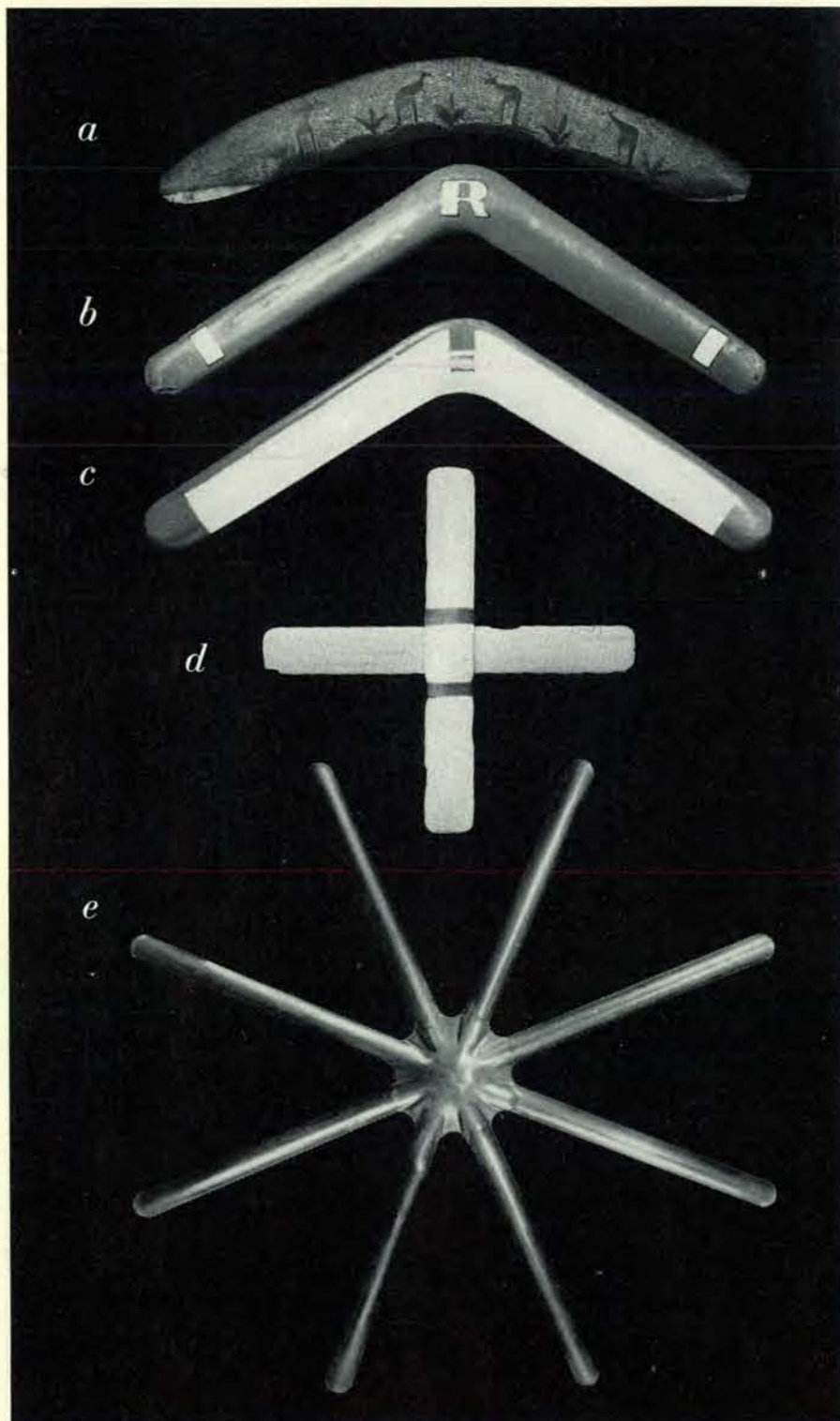
L'analisi delle forze che agiscono sulla traiettoria del boomerang e che lo fanno tornare al lanciatore, effettuata con l'aiuto di un calcolatore elettronico, è stata verificata sperimentalmente.

di Felix Hess

Pensate di gettare in aria un pezzo di legno e immaginate che esso descriva un ampio cerchio discendendo poi dolcemente ai vostri piedi. Assurdo! Ma il boomerang si comporta proprio cosí, ammesso che venga costruito in modo appropriato e che venga lanciato correttamente. Anch'io, come tanti altri, sono rimasto affascinato sin da piccolo dal problema del ritorno del boomerang: tuttavia solo pochi anni fa ho incominciato veramente a irritarmi perché non riuscivo a comprenderne lo strano comportamento. Studiavo allora fisica all'Università di Groninga, in Olanda, e durante le ore libere cominciai a costruire boomerang che lanciavo poi sui prati cercando di calcolarne la traiettoria. Questo interesse mi portò, a poco a poco, a sviluppare una teoria sul ritorno del boomerang, che esporrò nel seguito di questo articolo.

Come è noto, i boomerang hanno avuto origine tra gli aborigeni dell'Australia; infatti, per quanto siano stati ritrovati oggetti simili a boomerang anche in altre parti del mondo (in Egitto e in India, per esempio), questi, per quanto ci è noto, non sono in grado di ritornare al lanciatore. Forse il lettore resterà alquanto deluso nell'apprendere che anche la maggior parte dei boomerang australiani non tornano indietro. In effetti, i boomerang australiani possono grosso modo suddividersi in due categorie: boomerang da guerra e boomerang che tornano al lanciatore. Quelli della prima categoria, sono, come il nome suggerisce, armi da battaglia e da caccia; un buon boomerang da guerra può volare molto piú in là di un comune pezzo di legno, ma non è in grado di tornare indietro. I boomerang che tornano al lanciatore, di cui esiste un minor numero di esemplari, sono invece usati quasi esclusivamente per divertimento.

In realtà le cose non sono cosí semplici. Moltissime armi originarie dell'Australia sono molto simili al boomerang, cosicché la distinzione tra boomerang, bastoni da lancio e mazze non è cosí netta come potrebbe sembrare. Neanche la distinzione tra boomerang da guerra e boomerang che tornano al lanciatore è molto netta. La forma può differire secondo la tribú che li usa; alcune tribú delle coste settentrionali dell'Australia non li conoscono neppure. Inoltre, anche in quelle poche regioni in cui si sono trovati boomerang da ritorno esistevano anche boomerang da guerra. Un tipo poco comune di boomerang, usato solo nell'Australia nordorientale, è costituito da due sbarrette di legno unite tra loro a forma di croce; questo tipo di boomerang ritorna molto bene. Dall'aspetto di un dato boomerang non è sempre possibile distinguere se esso appartiene al tipo che ritorna oppure no. I boomerang che ritornano sono però meno massicci degli altri e l'angolo tra i loro bracci è generalmente meno ottuso. Il tipico boomerang da ritorno è lungo da 25 a 75 centimetri, largo da 4 a 5 centimetri e spesso da 6 a 13 millimetri. L'angolo tra i bracci può variare tra 80° e 140°; il peso può arrivare anche sino a 300 grammi.

La caratteristica forma a banana della maggior parte dei boomerang non ha molta influenza sulla capacità di tornare indietro; anche i boomerang a forma di *X, V, T, H, Y* (e probabilmente anche di altre lettere dell'alfabeto), possono essere costruiti in modo da ritornare assai bene. A questo fine l'elemento determinante è la sezione dei bracci che deve essere piú convessa da una parte che dall'altra, come nel caso di un profilo alare di aeroplano (*si veda la figura in alto a pagina 40*). Poiché,

Il boomerang sperimentale costruito dall'autore è fornito di una piccola lampada, montata in una punta e connessa a due batterie di 1,5 volt, alloggiate in un incavo al centro del boomerang. Questo dispositivo rende possibile registrare fotograficamente di notte il volo del boomerang. Il boomerang usato è « sinistro » poiché l'autore è mancino.

Il volo reale di un boomerang fotografato di notte nel parco comunale di Groninga; il boomerang usato è quello della figura nella pagina a fronte. (Poiché l'autore è mancino, questa fotografia e quelle alle pagine 47 e 48 sono state ribaltate per poter mostrare il caratteristico volo di un boomerang « destro ».) L'otturatore della macchina è stato tenuto aperto durante tutto il volo. La traccia corta e spessa è stata impressionata prima che il volo avesse inizio, quando il boomerang era ancora in mano al lanciatore. Il boomerang si è diretto dapprima verso destra, allontanandosi perciò dalla macchina fotografica, ha poi attraversato il campo visivo da destra verso sinistra, avvicinandosi di nuovo alla macchina, e infine è disceso vicino al lanciatore.

Volo simulato di un boomerang, determinato con un calcolatore elettronico in base alla teoria dell'autore. Questo grafico, che rappresenta la proiezione corrispondente alla fotografia in alto, è stato tracciato automaticamente e corretto per l'effetto di prospettiva. I punti rappresentano le posizioni del boomerang a intervalli di tempo di un decimo di secondo. Si è continuato a determinare le successive posizioni sino a che il boomerang non è giunto due metri al disotto del punto di partenza. Le condizioni iniziali sono state modificate continuamente sino a ottenere una traiettoria molto simile a quella registrata nella foto.

La raccolta di boomerang dell'autore comprende un boomerang australiano primitivo della tribú Ooldea, ricavato da un pezzo di legno di acacia (*a*) e molti boomerang costruiti dall'autore stesso. Tra gli altri, un tipico boomerang « destro », fatto di legno compensato e sagomato in modo da assumere la necessaria sezione a forma di profilo alare (*b*); un boomerang in compensato di forma simmetrica, tale da risultare contemporaneamente sia « destro » sia « sinistro » (*c*); un boomerang a croce in legno di balsa, estremamente leggero e in grado di volare in casa (*d*); un boomerang a otto bracci ricavato da una lastra di alluminio (*e*). Ai bracci del boomerang a croce sono attaccati con elastici due pezzetti di piombo che costituiscono una zavorra che può essere spostata verso l'esterno in modo da aumentare il momento di inerzia del boomerang e accrescere quindi il diametro della traiettoria. Torcendo i bracci del boomerang di alluminio questo può mutarsi da « sinistro » in « destro » e viceversa. Tutti gli otto bracci di questo boomerang hanno eccentricità zero e pertanto ci si aspetterebbe che la coppia agente secondo un asse perpendicolare alla direzione del moto sia nulla (questa coppia è indicata nel testo con il simbolo T_2). Però, anche questo boomerang « si corica »; in questo caso, il « coricamento » deve essere attribuito interamente agli effetti di scia.

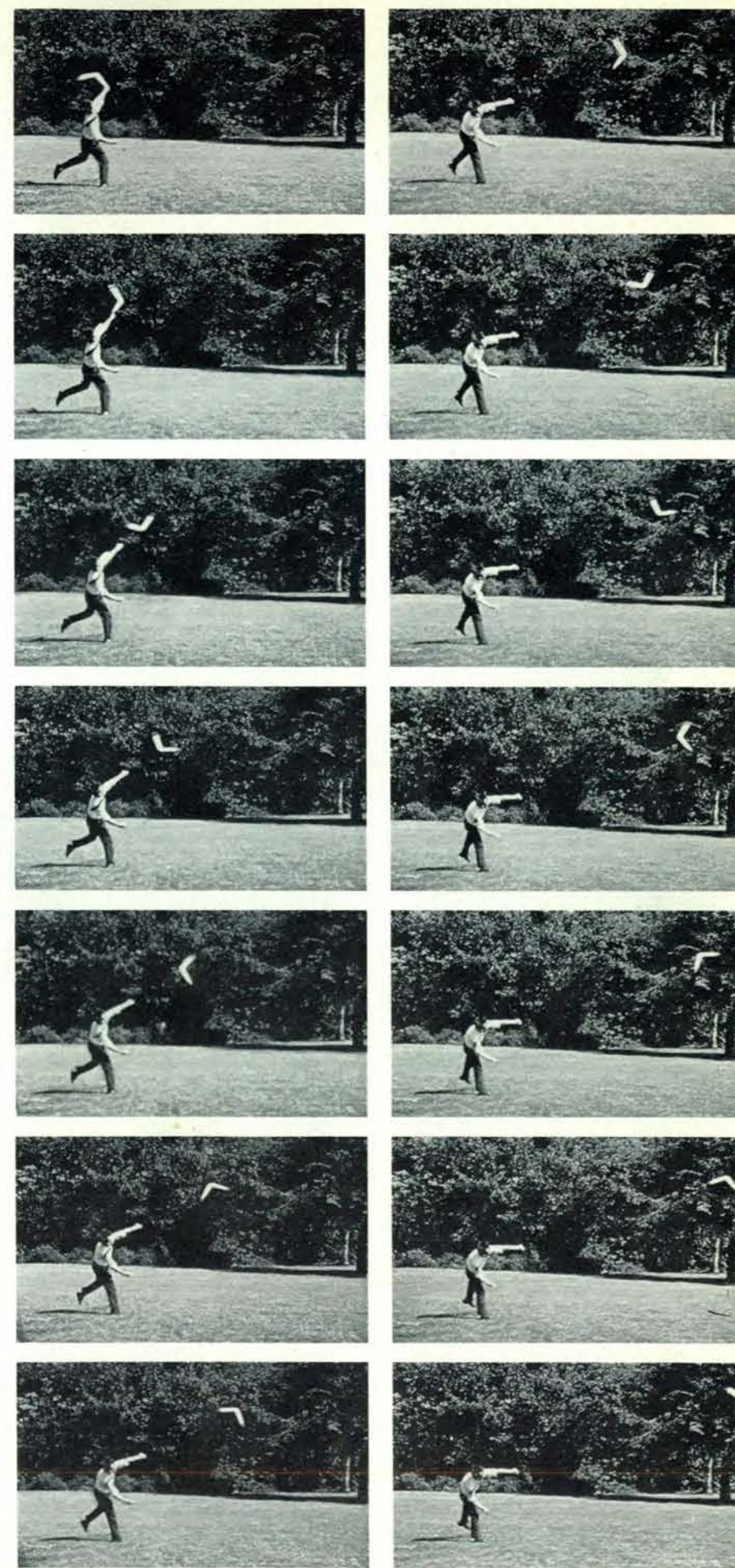
per ragioni di stabilità, la struttura di un boomerang deve stare approssimativamente in un piano, volendo ricavarne uno da un pezzo di legno la forma piú ovvia da scegliere è quella che segue le venature del legno stesso. Se invece si vogliono usare altri materiali, come legno compensato, plastica o metallo, ci sono molte piú possibilità di scelta.

In che modo bisogna lanciare un boomerang per farlo ritornare indietro? Di regola se ne afferra con la destra un'estremità e la si tiene verticalmente in alto, cercando di mantenere la parte piú convessa, cioè la faccia superiore, diretta verso sinistra (*si veda l'illustrazione nella pagina a fronte*). Ci sono poi due possibilità: l'estremità libera può essere diretta in avanti (come fanno gli australiani), oppure all'indietro; tale scelta dipende però unicamente dalle preferenze personali. A questo punto, si porta il braccio destro dietro la spalla e si lancia in avanti il boomerang secondo una linea orizzontale o leggermente inclinata verso l'alto. Perché il lancio abbia successo sono necessarie due condizioni. Primo: il piano del boomerang, nell'istante in cui viene lasciato andare, deve essere approssimativamente verticale o leggermente inclinato verso destra, ma mai orizzontale. Secondo: al boomerang deve essere impresso un rapido movimento rotatorio che si ottiene fermando bruscamente il braccio destro, che effettua il lancio, nell'istante in cui lo si abbandona; per l'inerzia di cui è dotato, il boomerang incomincerà a ruotare attorno a un punto che, in quell'istante, si trova nella mano destra del lanciatore. Il boomerang acquista quindi, contemporaneamente, una velocità di avanzamento e una velocità di rotazione. In questo modo inizia il suo volo con una velocità lineare di circa 100 chilometri all'ora e una velocità angolare di circa 10 giri al secondo.

Dapprima il boomerang sembra volare via in linea retta, ma dopo un po' la sua traiettoria si incurva a sinistra, spesso verso l'alto; descrive quindi un ampio giro piú o meno circolare e ridiscende poi vicino ai piedi del lanciatore, oppure descrive un secondo giro prima di cadere a terra. Talvolta, per percorrere il secondo giro, volta a destra, cosicché la traiettoria complessiva assume l'aspetto di un otto. È veramente stupendo vedere il boomerang descrivere l'ampia volta, perdere velocità, librarsi per un attimo a circa tre metri sopra la nostra testa e discendere quindi lentamente come un elicottero. Ma qualsiasi descrizione può dare soltanto una pallida idea del volo di un boomerang: bisogna stare all'aria aperta per capire come questo fenomeno si svolga realmente nelle tre dimensioni e sentire il tenue, pulsante, sibilante suono dei bracci del boomerang che si muovono rapidamente nell'aria.

Ogni boomerang ha caratteristiche particolari per ciò che riguarda le difficoltà del lancio, la forma della traiettoria e la capacità di compiere volteggi. Inoltre, un boomerang può descrivere traiettorie differenti a seconda del modo in cui viene lanciato. La precisione del ritorno dipende in larga misura dall'abilità del lanciatore, che deve essere in grado di valutare anche l'influenza del vento. La massima distanza raggiunta durante il volo può essere dell'ordine di 40 metri; può essere però molto minore o anche piú del doppio. Il punto piú alto della traiettoria può trovarsi a oltre 15 metri di altezza, ma può anche essere inferiore a un metro e mezzo. Ho sentito dire che i moderni boomerang australiani raggiungono distanze superiori ai 90 metri e hanno un perfetto ritorno; tuttavia, e mi dispiace molto, io non sono riuscito a costruire un boomerang in grado di andare oltre i 55 metri. Se si osserva nella realtà il volo di un boomerang, si ha spesso l'impressione che questo duri circa mezzo minuto, mentre, in effetti, la sua durata è di circa otto secondi.

Nella precedente descrizione generale si è tacitamente supposto che il lanciatore non sia mancino e che faccia uso di un boomerang « destro ». Se si osserva, dalla parte del lato convesso, il volo di un normale boomerang di questo tipo, il suo verso di rotazione deve essere antiorario (*si veda la figura in basso alla pagina seguente*). Per ogni braccio del boomerang si può quindi parlare di un bordo d'attacco e di un bordo di fuga. Nei boomerang usati dagli indigeni australiani, sia il bordo d'attacco sia il bordo di fuga sono piú o meno affilati, mentre il bordo d'attacco del braccio di un moderno boomerang è arrotondato come quello dell'ala di un aeroplano. Talvolta, infine, i bracci sono leggermente ritorti, cosicché i loro bordi d'attacco sono un po' rialzati alle estremità.

In questa dimostrazione dell'autore si osserva la prima parte del volo di un boomerang che ritorna. All'istante del lancio, il piano del boomerang è approssimativamente verticale; immediatamente prima di essere lasciato andare, al boomerang è stato impresso un rapido movimento rotatorio arrestando bruscamente il braccio che effettuava il lancio. Nel film, girato alla velocità di 64 fotogrammi al secondo, si ha una rivoluzione ogni 6 fotogrammi. Il boomerang ruota quindi alla velocità di 10 o 11 rivoluzioni al secondo circa.

A questo punto dovrebbe essere chiaro che un boomerang è progettato per ruotare secondo un verso ben definito; se viene fatto ruotare nel verso opposto a quello per cui è costruito, il suo volo non ha nessuna somiglianza con quello di un buon boomerang. D'altra parte, l'immagine speculare di un tale boomerang « destro » funziona bene solo se viene fatto ruotare in senso orario. Questo boomerang « sinistro » è perfettamente adatto per un lanciatore mancino, come me. Sotto ogni aspetto, anche per ciò che riguarda la traiettoria, un lancio effettuato con la sinistra, e con un boomerang « sinistro », costituisce la esatta immagine speculare di un lancio effettuato con la destra. Si può notare ancora che in Australia esistono sia boomerang « destri » che boomerang « sinistri ». Sagomando con cura un boomerang, in modo da conferirgli una sezione a forma simmetrica, è possibile costruire dei boomerang « ambidestri », tali, cioè, da funzionare ugualmente bene nell'uno o nell'altro modo.

Qual è il modo migliore per cercare di capire lo straordinario comportamento di un boomerang che ritorna? Com'è naturale, questo fenomeno cosí affascinante ha attirato l'attenzione di molta gente e su di esso sono stati scritti numerosi articoli. La maggior parte di essi sono apparsi tra il 1870 e il 1920, periodo in cui l'aerodinamica muoveva i suoi primi passi. Solo una parte di questa letteratura può essere chiamata scientifica; spesso, infatti, si trascuravano le osservazioni piú elementari (durata del volo, dimensioni della traiettoria) tanto che, in alcuni casi, le descrizioni confuse accentuavano il carattere fantastico del boomerang. Naturalmente, l'intero fenomeno può venire spiegato in termini di interazione del boomerang con l'aria; nel vuoto, anche per un boomerang, la traiettoria percorsa non è altro che una parabola. A causa della complessità del problema è tuttavia molto difficile calcolare con esattezza queste interazioni. Tuttavia, vediamo ora di affrontare l'argomento in un modo abbastanza semplice.

Se si lancia un boomerang in direzione orizzontale, con il piano di rotazione disposto verticalmente, ciascun braccio di esso « taglierà » l'aria e questa, a causa degli speciali profili dei bracci, eserciterà una forza diretta dalla superficie meno convessa, la superficie inferiore, verso quella piú convessa, la superiore. Questa forza è la stessa forza di sostentamento (portanza) che si esercita sulle ali di un aeroplano. In un lancio effettuato con la destra, tale forza è diretta da destra verso sinistra, rispetto al lanciatore; questa forza tuttavia non è sufficiente, da sola, a far curvare il boomerang verso sinistra.

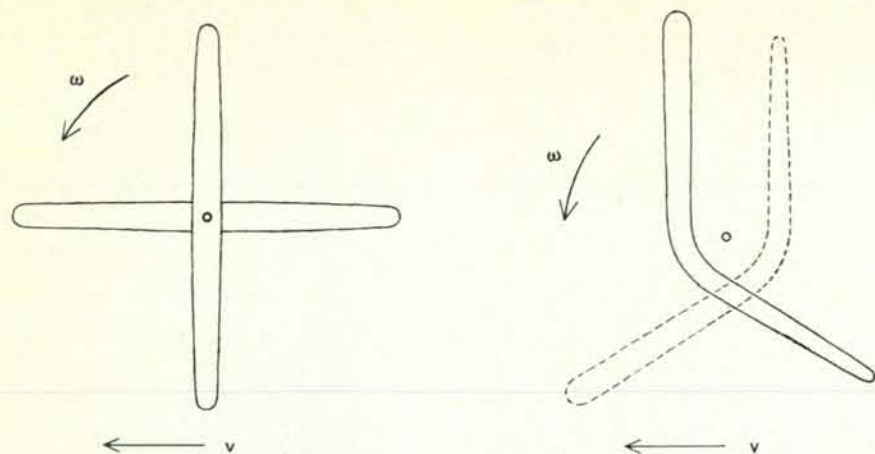
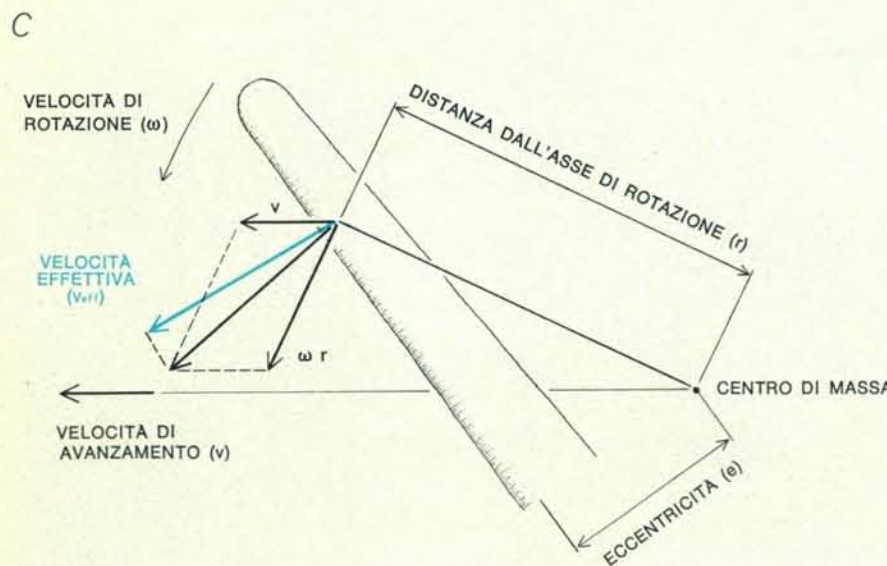
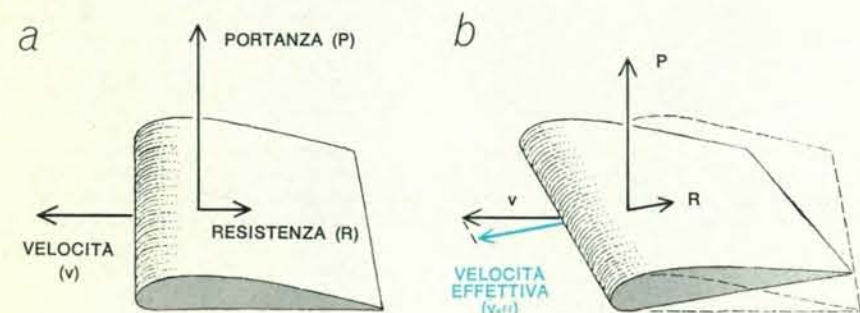
Seguendo il movimento di un braccio del boomerang mentre ruota, si può osservare che la sua velocità rispetto all'aria non rimane costante. Quando il braccio punta verso l'alto la componente in avanti della velocità del boomerang si somma a quella dovuta alla rotazione, mentre, quando punta verso il basso, le due velocità hanno verso opposto e la velocità risultante è minore, giungendo in alcuni punti persino ad annullarsi (*si veda la figura in basso nella pagina a fronte*). Per questa ragione le forze aerodinamiche che agiscono sul braccio di un boomerang sono maggiori quando esso punta verso l'alto che quando punta verso il basso e pertanto, in media, il boomerang è sottoposto non solo a una forza diretta da destra verso sinistra, ma anche a una coppia che agisce lungo un asse orizzontale e tende a spingere verso sinistra la parte del boomerang che viene a trovarsi piú in alto. In realtà non è possibile osservare questo ribaltamento poiché il boomerang ruota rapidamente e pertanto si comporta come un giroscopio.

Ora, un giroscopio (che non è altro che un volano in rapida rotazione) gode della proprietà di non cedere all'azione di coppie che lo sollecitino, ma di modificare il proprio orientamento facendo girare il piano di rotazione at-

La sezione di un boomerang è piú convessa da un lato che dall'altro (*a*). In *b* sono mostrati tre profili; il primo, a forma di lente, è quello di un boomerang usato dagli aborigeni australiani; gli altri due hanno il bordo d'attacco arrotondato come un'ala di aeroplano. Nel volo (*c*), l'aria esercita su quest'ala una forza che può essere scomposta in due componenti: la portanza (*P*), normale alla velocità e diretta dal lato piú piatto al piú convesso, e la resistenza (*R*) diretta in verso opposto alla velocità (*v*).

Il tratteggio indica i bordi d'attacco di un boomerang « destro » (*a*) e di un boomerang « sinistro » (*b*); entrambi i boomerang sono visti dalla loro parte piú convessa, cioè dalla parte superiore. In queste condizioni il verso di rotazione del boomerang « destro » risulta antiorario, quello del boomerang « sinistro » orario. Se vengono fatti ruotare in senso opposto, entrambi i boomerang non funzionano bene. Per ogni aspetto, ivi compresa la traiettoria, il boomerang « sinistro » è l'immagine speculare di quello « destro ».

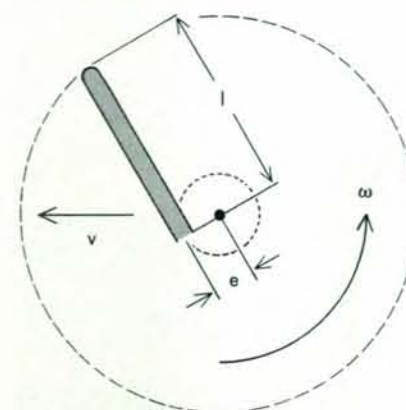
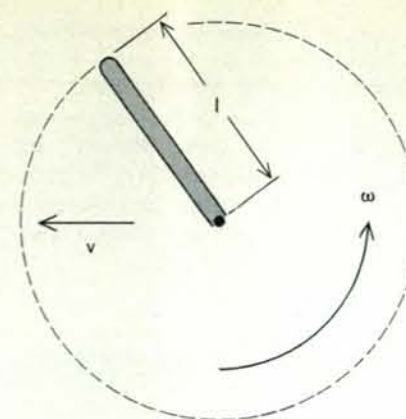
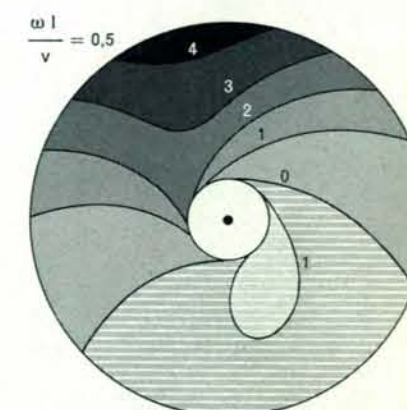
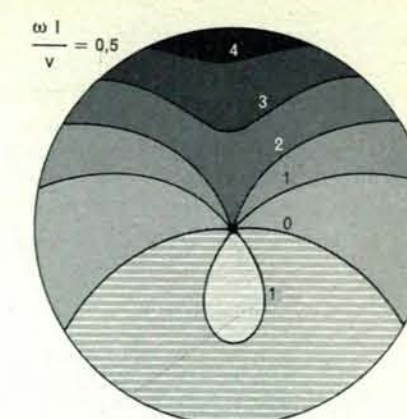
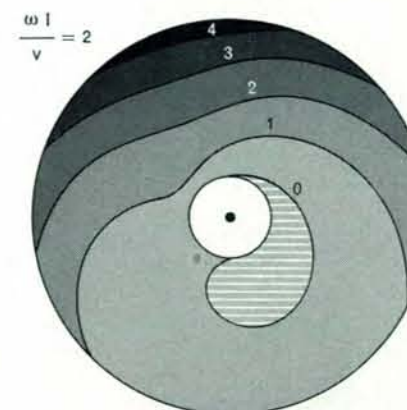
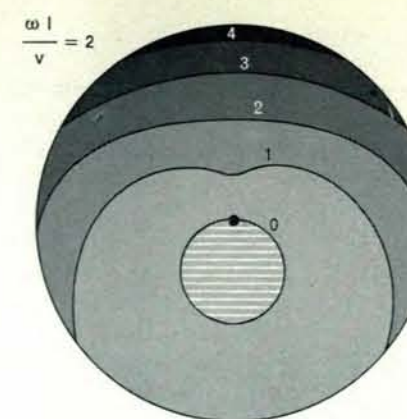
La traiettoria tipica di un boomerang ha un diametro di circa 90 metri e un'altezza massima di circa 10 metri. Il boomerang inizia il volo con una velocità di circa 100 chilometri all'ora e una frequenza di rotazione di circa 10 rivoluzioni al secondo. Resta in aria per circa 8 secondi. Si possono avere traiettorie molto diverse secondo le caratteristiche del boomerang; si possono inoltre ottenere traiettorie molto differenti, ma tutte all'incirca con lo stesso diametro, anche con uno stesso boomerang.

La velocità del braccio di un boomerang rispetto all'aria non è costante. Se il braccio punta verso l'alto, la velocità in avanti del boomerang si somma a quella dovuta alla rotazione ($v + a$, *a sinistra*), se invece punta verso il basso queste due velocità hanno verso opposto, e la velocità risultante del braccio rispetto all'aria sarà piú piccola ($v - a$, *a sinistra*). Ne consegue che la forza aerodinamica, che è diretta verso il lato piú convesso, è piú intensa quando il braccio punta verso l'alto che non quando punta verso il basso (*al centro*). Sul boomerang non agisce quindi solo una forza diretta da destra verso sinistra, ma anche, in media, una coppia con asse orizzontale che tende a piegare la parte superiore del boomerang verso sinistra. Poiché il boomerang è in rapida rotazione esso si comporta come un giroscopio (*a destra*). Se si applica una coppia a un giroscopio (che non è altro che un volano ad asse libero rotante con grande velocità), esso non si assoggetta alla coppia, ma modifica il suo orientamento ruotando attorno a un asse perpendicolare sia all'asse di rotazione sia all'asse della coppia applicata. Questo moto è chiamato precessione. Allo stesso modo il boomerang nel suo complesso modifica il proprio orientamento girando a sinistra.

Il centro di massa di un boomerang a croce (*a sinistra*) si trova sull'intersezione dei bracci; i bracci di un tale boomerang hanno eccentricità zero. Nel caso di un boomerang normale (*a destra*) un braccio precede e l'altro segue il centro di massa. Il braccio che lo precede ha eccentricità positiva, quello che lo segue ha eccentricità negativa.

Il braccio di un boomerang assomiglia all'ala di un aereo che si muove in linea retta con velocità v rispetto all'aria. In *a* il bordo d'attacco dell'ala è perpendicolare alla velocità v: in *b* la velocità v ha una componente parallela all'ala che non ha alcuna influenza sulle forze aerodinamiche. Si sostituisce, perciò, alla velocità v la sua componente perpendicolare all'ala, chiamata velocità effettiva, ovvero v_{eff} (*colore*). Sia la portanza sia la resistenza dell'ala sono proporzionali al quadrato della velocità effettiva v_{eff}^2. In *c* è mostrato come si ricava la velocità effettiva di un punto sul braccio del boomerang. Anzitutto si sommano vettorialmente la velocità v e la velocità di rotazione ωr; si trova in questo modo la velocità totale (*freccia nera, vettore risultante*) la cui componente perpendicolare al braccio del boomerang è la velocità effettiva v_{eff} (*colore*).

torno a un asse perpendicolare sia all'asse di rotazione sia a quello della coppia; nel caso del boomerang, l'orientamento del piano volta a sinistra. Questo moto è chiamato precessione. (Il fenomeno della precessione, per citare un esempio classico, viene sfruttato in bicicletta per fare le curve « senza mani »: se ci si inclina verso sinistra la ruota anteriore della bicicletta volta a sinistra.) In conclusione il boomerang modifica il proprio orientamento verso sinistra in modo tale che il suo piano formerebbe un angolo gradualmente crescente rispetto alla traiettoria se non fosse per le forze sempre maggiori che, agendo sulla traiettoria stessa, tendono a renderla ancora parallela al piano del boomerang. Il risultato è che la traiettoria si incurva verso sinistra e l'angolo tra il piano del boomerang e la traiettoria viene mantenuto molto piccolo.

In pratica, si osserva spesso che, per quanto il piano del boomerang sia all'inizio del volo pressoché verticale, alla fine risulta approssimativamente orizzontale. In altre parole, il piano del boomerang si rovescia lentamente come se la parte superiore fosse spinta verso destra; il boomerang in effetti « si corica ». Questo comportamento indica che, in media, l'asse della coppia può non essere perfettamente orizzontale.

La spiegazione qui esposta è senz'altro approssimativa, ma tiene conto degli elementi essenziali: il comportamento del boomerang è infatti una combinazione di quello dell'ala di un aereo e di quello di un giroscopio. Passiamo ora a considerare il problema in maniera piú dettagliata.

Poiché le forze aerodinamiche che agiscono sulle ali degli aerei sono conosciute abbastanza bene, è conveniente assimilare ogni braccio del boomerang a un'ala d'aereo. Considerando un'ala di questo tipo possiamo osservare che essa si muove in avanti e nello stesso tempo ruota intorno al centro di massa del boomerang. Nella seguente trattazione si assume esplicitamente che non vi sia alcuna componente del moto normale al piano del boomerang. Mentre in un boomerang a croce (come pure nel rotore di un elicottero) il centro di massa si trova nel punto di intersezione delle pale, questo non accade per un normale boomerang in cui un braccio precede il centro di massa mentre l'altro lo segue (*si veda la figura in alto in questa pagina*); per questo entrambi i bracci sono detti « eccentrici » e l'eccentricità è data dalla distanza di ciascuno di essi dal centro di massa. Il braccio che precede il centro di massa ha eccentricità positiva, quello che lo

La distribuzione della portanza sul braccio di un boomerang, che si muove verso sinistra e che ruota in verso antiorario è stata ricavata da un diagramma che riporta la distribuzione di v_{eff}^2 per valori diversi del rapporto velocità angolare-velocità di avanzamento. Per ottenere diagrammi del tipo di quelli al centro e a destra si procede come segue. Si calcola per un dato orientamento del braccio del boomerang il valore di v_{eff}^2 per ogni punto di esso: si lascia ruotare il braccio di un piccolo angolo e si effettua nuovamente tale calcolo ripetendo poi tante volte questo procedimento sino a che il braccio, spazzando l'area di un cerchio, non abbia effettuato un'intera rivoluzione. I diagrammi in alto sono relativi a un braccio di lunghezza l ed eccentricità zero; quelli in basso sono relativi a un braccio di lunghezza l ed eccentricità $l/5$. Quanto piú marcata è l'ombreggiatura, tanto piú alto è il valore di v_{eff}^2. Sono state tracciate alcune linee lungo le quali il valore di v_{eff}^2 resta costante; i valori corrispondenti, espressi in termini di $\omega l v$, sono indicati dai numeri che contrassegnano le linee suddette. Le aree tratteggiate corrispondono a zone in cui l'aria colpisce il braccio dalla parte del bordo di fuga. I valori del rapporto $\omega l/v$ sono 2 (rotazione veloce) e 0,5 (alta velocità di avanzamento). L'ombreggiatura piú marcata nelle parti superiori dei diagrammi indica che sul braccio deve agire una coppia secondo un asse parallelo a v. I diagrammi per il braccio con eccentricità zero (*in alto*) mostrano una perfetta simmetria, contrariamente a quelli relativi al braccio con eccentricità positiva (*in basso*). Nel secondo caso, infatti, le zone corrispondenti ai valori piú alti di v_{eff}^2 sono spostate in direzione di v. Questo indica che la coppia media possiede una componente diretta secondo un asse perpendicolare alla direzione della velocità di avanzamento v.

segue ha eccentricità negativa. Ogni punto dell'ala è investito da una corrente d'aria che varia con continuità in intensità e in direzione secondo la zona che si considera. Talvolta la corrente d'aria può anche soffiare sul bordo di fuga del profilo alare, come si può facilmente immaginare considerando il braccio che punta in basso di un boomerang che ruota con bassa velocità angolare mentre si muove rapidamente in avanti. Quali sono le forze che agiscono su un'ala che si muove in questo modo particolare?

Cominciamo con l'esaminare un caso piú semplice, un'ala che si muove su una traiettoria rettilinea con velocità costante v rispetto all'aria (*si veda la figura in basso nella pagina a fronte*). È consuetudine scomporre la forza aerodinamica in due componenti: la portanza (normale a v) e la resistenza (opposta a v): entrambe sono proporzionali a v^2. Se il bordo dell'ala non è perpendicolare alla velocità, v ha una componente parallela all'ala che non ha alcuna influenza sulle forze aerodinamiche e perciò la velocità v deve essere sostituita dalla sua componente perpendicolare al bordo, cioè dalla « velocità effettiva » v_{eff}. In questo caso, le forze sono proporzionali a v_{eff}^2.

Tornando al braccio del boomerang è chiaro che ogni suo punto è dotato della stessa velocità di avanzamento v del boomerang; la velocità relativa all'aria, che tiene conto del moto rotatorio, è invece diversa da punto a punto. Per un dato valore ω della velocità angolare e per un punto posto a distanza r dall'asse di rotazione (che passa per il centro di massa del boomerang), questa velocità è ωr. Per ogni punto del braccio si può allora trovare la risultante delle due velocità v e ωr, la cui componente secondo la normale al braccio è v_{eff}. Naturalmente, il valore di v_{eff} per un punto determinato del braccio varia con continuità durante tutto il periodo di rivoluzione; si suppone però che i contributi alla resistenza e alla portanza di ogni parte del boomerang siano ancora in ogni istante proporzionali a v_{eff}^2.

È evidente che il valore di v_{eff}^2 dipende sia dalla posizione del punto sul braccio del boomerang sia dall'orientamento di quest'ultimo nell'istante che si

considera. Si calcoli ora, per un dato orientamento del braccio del boomerang, il valore di v_{eff}^2 per ogni punto di esso; si lasci ruotare il braccio di un piccolo angolo e si effettui nuovamente tale calcolo ripetendo poi tante volte questo procedimento sino a che il braccio, spazzando l'area di un cerchio, non abbia effettuato un'intera rivoluzione. In questo modo si ottengono dei diagrammi simili a quelli mostrati nella figura a pagina 43, in cui sono state disegnate alcune delle linee lungo le quali v_{eff}^2 ha un valore costante. Queste figure possono dare un'idea della distribuzione della portanza e della resistenza sul braccio ruotante di un boomerang per valori diversi del rapporto velocità angolare-velocità di avanzamento.

Le parti superiori di ogni diagramma sono piú scure di quelle inferiori, per indicare valori maggiori di v_{eff}^2 e quindi della portanza. Si può cosí osservare immediatamente che esiste una coppia media con asse parallelo alla velocità di avanzamento v (orizzontale nelle figure). Nei diagrammi relativi al braccio con eccentricità zero si osserva una perfetta simmetria, che non si riscontra invece nei diagrammi relativi al braccio con eccentricità positiva, in cui la zona piú scura è spostata in avanti nella direzione di v (per eccentricità negativa risulterebbe spostata all'indietro). Questo indica che la coppia media ha anche una componente lungo un asse perpendicolare a v.

Sono stati calcolati i valori medi, ottenuti da misure effettuate su tutto un periodo di rivoluzione, per le seguenti forze e coppie: la portanza P; la coppia T, con la componente T_1 secondo un asse parallelo a v (è la coppia che fa girare il boomerang a sinistra) e la componente T_2 secondo un asse perpendicolare a v (è la coppia che fa « coricare » il boomerang); la resistenza R che frena la velocità v, e la coppia T_R che frena

Traiettorie teoriche per un dato boomerang « lanciato » con differenti velocità iniziali (v) rappresentate mediante tre proiezioni ortogonali: traiettoria vista dall'alto (*a sinistra*), vista da dietro il lanciatore (*al centro*) e vista dalla destra del lanciatore (*a destra*). Se la velocità iniziale è piccola (*in alto*), il ritorno del boomerang non è molto preciso. Con una velocità maggiore (*al centro e in basso*), il boomerang sta in aria piú a lungo. I punti sono separati da intervalli di un decimo di secondo.

Traiettorie teoriche per un dato boomerang « lanciato » con velocità iniziale costante, ma con diversi angoli (ϑ) tra il piano del boomerang e l'orizzonte. Se alla partenza il piano del boomerang è approssimativamente verticale (*in alto*), il boomerang vola basso e la traiettoria si incurva verso l'interno. Al diminuire di ϑ (*al centro e in basso*) la traiettoria si spinge verso l'alto incurvandosi meno all'interno e, verso la fine, volgendo addirittura verso l'esterno. Le proiezioni sono le stesse già usate.

la velocità angolare ω. Si è trovato che, a eccezione di T_2, che risulta esattamente proporzionale all'eccentricità, nessuna di queste grandezze dipende dall'eccentricità dei bracci del boomerang, che risultano quindi identici sotto ogni aspetto. La dipendenza di tali grandezze da ω e da v (per rotazioni sufficientemente rapide) è data approssimativamente dalla tabella seguente:

$$P \div \omega^2$$
$$T_1 \div \omega v^2$$
$$T_2 \div \omega v$$
$$R \div \omega v$$
$$T_R \div \omega^2$$

(Il segno $\div$ significa « proporzionale a »; il fattore di proporzionalità dipende strettamente dalla forma del braccio del boomerang.)

Questa è tutta l'aerodinamica necessaria. Le forze e le coppie che agiscono sul boomerang nel suo complesso si ottengono sommando i valori corrispondenti per ciascuno dei bracci. I contributi di T_2 dovuti a bracci di eccentricità opposta si eliminano tra loro, parzialmente o completamente. È necessario infine ricordare un fattore che, pur essendo stato completamente trascurato, ha probabilmente una grande importanza: la scia. Un braccio di boomerang, che taglia l'aria già agitata dal braccio che lo precede, non è soggetto alle stesse forze che subirebbe volando nell'aria « vergine ». È però estremamente difficile tener conto degli effetti della scia, ma è plausibile che essi provochino un aumento del rapporto $T_2 : T_1$.

Queste traiettorie teoriche si riferiscono a boomerang differenti, cioè aventi il parametro β differente; i boomerang sono stati « lanciati » nel modo descritto nelle pagine precedenti. Valori piú alti di β indicano che il boomerang « si corica » piú velocemente e raggiunge prima un'orientazione orizzontale ($\vartheta = 0$). Quando questo accade, la traiettoria vista dall'alto mostra un punto di flesso e, subito dopo, si incurva a destra. Le proiezioni ortogonali sono le stesse di quelle alle pagine precedenti.

Arriviamo ora a un'importante questione: come si muove il boomerang sotto l'influenza delle forze e delle coppie aerodinamiche suddette (e, naturalmente, della forza di gravità)? Come è stato detto in precedenza, la coppia media T impone al boomerang un moto di precessione giroscopica. Studiamo più dettagliatamente la dinamica del giroscopio. Se su un giroscopio rotante intorno al proprio asse con velocità angolare ω agisce una coppia T con asse perpendicolare all'asse di rotazione, il giroscopio acquista un moto di precessione il cui asse è perpendicolare sia all'asse di rotazione sia all'asse della coppia. Se chiamiamo Ω la velocità angolare di precessione esiste una semplice relazione tra Ω, ω, T e il momento d'inerzia del giroscopio I: $\Omega = T/I\omega$. Come si è visto, in un boomerang, T è proporzionale a ωv, cosicché la velocità angolare di precessione Ω risulta proporzionale a $\omega v/I\omega$, cioè a v/I, e non dipende perciò dalla velocità angolare ω del boomerang.

Da quanto detto sopra si può trarre una conclusione ancor piú sorprendente. La velocità angolare di precessione è proporzionale a v/I e il fattore di proporzionalità dipende strettamente dalla struttura del boomerang; si può quindi scrivere $\Omega = cv$, in cui c è un parametro caratteristico per ciascun boomerang. Ora, se la velocità del boomerang raddoppia, raddoppia anche la velocità con cui varia l'orientamento del suo piano. Ma ciò implica che la traiettoria del boomerang deve restare invariata! Questo è proprio quello che succede quando si fa una curva in bicicletta: se si raddoppia la velocità con cui si pedala e allo stesso tempo si gira il manubrio due volte piú in fretta, si percorre esattamente la stessa curva.

Si può quindi dire, approssimativamente, che il diametro della traiettoria del boomerang non dipende né dalla velocità angolare né dalla velocità di avanzamento. Ciò significa che il boomerang ha già in se stesso anche il diametro della sua traiettoria. In realtà, questa conclusione deve essere modificata. Sotto l'influenza della gravità, la traiettoria descritta giace approssimativamente sulla superficie di una grande sfera e è il diametro di questa sfera, e non quello della traiettoria, che risulta fissato per ogni boomerang. Il diametro della traiettoria può risultare piú piccolo se questa viene descritta sulla parte superiore della superficie sferica.

La dipendenza da ϑ dell'orbita dei boomerang reali è comprovata da queste due fotografie; ϑ (l'angolo formato inizialmente tra il piano del boomerang e l'orizzonte) nella fotografia in basso è di 20° inferiore a quello nella fotografia in alto. Queste traiettorie possono essere confrontate con quelle teoriche della colonna centrale a pagina 45.

Le dimensioni della traiettoria del boomerang sono proporzionali al suo momento d'inerzia e sono tanto piú piccole quanto maggiore è la portanza dei profili alari. Se si vuole quindi un boomerang che descriva una traiettoria di piccole dimensioni (contenuta, per esempio, all'interno di una camera) bisogna costruirlo con materiali leggeri; per ottenere traiettorie molto ampie è invece necessario un boomerang molto pesante con un profilo alare la cui portanza non sia troppo grande (e, naturalmente, la cui resistenza sia la piú piccola possibile).

La portanza media P non entra nel calcolo della traiettoria, perciò, in teoria, ogni componente del moto del boomerang in direzione perpendicolare al suo piano è supposta nulla. Inoltre anche della forza di gravità interessa solo la componente parallela al piano del boomerang. Dalle osservazioni sperimentali risulta che la velocità angolare ω del boomerang (a differenza della velocità di avanzamento v) non varia apprezzabilmente durante il volo. Se ω è abbastanza grande, può perciò venire

Il confronto tra alcune traiettorie reali registrate fotograficamente (*a sinistra*) e le corrispondenti traiettorie teoriche, ricavate sulla base della teoria dell'autore (*a destra*), mostra una notevole somiglianza sia nell'aspetto generale sia in alcuni dettagli. Poiché la macchina fotografica non era piazzata molto lontano dal lanciatore (si trovava a 45 metri) i tratti della traiettoria in cui il boomerang era piú vicino alla macchina fotografica risultano anormalmente ingranditi; nei calcoli si è tenuto conto di questo effetto.

trascurato completamente nel calcolo della traiettoria (si può quindi trascurare anche la coppia resistente T_R). C'è infine la resistenza media R che fa perdere al boomerang parte della sua energia.

A questo punto si ha tutto ciò che occorre per scrivere le equazioni della traiettoria teorica del boomerang; tali equazioni possono essere risolte numericamente da un calcolatore elettronico e danno la velocità, l'orientamento e la posizione del boomerang in ogni istante, se si forniscono al calcolatore, oltre al programma di calcolo, anche due gruppi di numeri. I numeri del primo gruppo, che fissano le proprietà del boomerang, sono detti parametri del boomerang. Essi sono: c, che stabilisce la velocità di precessione e è strettamente legato alle dimensioni della traiettoria (un alto valore di c indica una traiettoria piccola); β, angolo che misura il rapporto $T_2 : T_1$ e determina la velocità con cui il boomerang « si corica », e p, che costituisce una misura della resistenza. Il secondo gruppo di numeri fissa, teoricamente, il modo in cui il boomerang viene lanciato (cioè le condizioni iniziali); queste vengono determinate dando i valori di v, di ϑ (angolo tra la direzione di v e la linea dell'orizzonte) e di ψ (angolo tra la direzione di v e l'orizzontale passante per il piano del boomerang).

In questo modo si determinarono teoricamente alcune traiettorie, ma risultò ben presto che il trascurare completamente il movimento in direzione perpendicolare al piano del boomerang non era affatto giustificato. Si trova, in realtà, che i boomerang deviano dalle loro traiettorie « ideali », tendenza questa che si può spesso osservare in particolare al termine del volo. Per quanto queste deviazioni possano essere trascurate nei boomerang molto leggeri, ciò non sembra essere possibile per quelli piú pesanti. Si è quindi tenuto conto di questo effetto considerandolo come una piccola perturbazione del moto ideale.

Per ogni traiettoria calcolata sono state effettuate con un tracciatore automatico di grafici (*plotter*) tre proiezioni ortogonali costituite da un certo numero di punti che rappresentano le posizioni successive del boomerang a intervalli di un decimo di secondo. Si continuò il calcolo della traiettoria sino a che il boomerang teorico non raggiunse un punto situato due metri piú in basso del punto di partenza. Le tre proiezioni sono state scelte come segue: proiezione XY (volo visto dall'alto); proiezione ZY (visto da dietro il lanciatore); proiezione ZX (visto dalla destra del lanciatore). Le figure a pagina 44 e a pagina 45 mostrano che la forma della traiettoria per un dato boomerang varia secondo il lancio, in particolare secondo la velocità iniziale e l'angolo ϑ tra il piano del boomerang e l'orizzonte. Infine, la figura a pagina 46 mostra come, per un dato lancio, la traiettoria dipenda dal parametro β del boomerang.

In che modo si possono paragonare queste traiettorie teoriche con i voli reali di un boomerang? Per effettuare un confronto obiettivo si dovrebbe registrare le posizioni assunte dal boomerang durante il volo; si potrebbero usare, per esempio, due macchine fotografiche. Per controllare le condizioni iniziali sarebbe invece necessaria una macchina lancia-boomerang. Sinora non ho avuto l'opportunità di effettuare esperimenti di questo tipo; ho però fatto registrare, con una sola macchina fotografica, la proiezione della traiettoria reale di un boomerang. In una delle ali del boomerang è stata montata una piccola lampadina elettrica alimentata da due minuscole batterie di 1,5 volt, connesse in serie e alloggiate in un incavo nella parte centrale del boomerang (*si veda la figura a pagina 36*). In questo modo il boomerang portava nel suo volo una sorgente luminosa abbastanza intensa da poter essere fotografata di notte. Nella figura qui sopra sono mostrate alcune delle traiettorie ricavate in questo modo; sono riportate anche, per confronto, le traiettorie teoriche.

Poiché la macchina fotografica non era piazzata abbastanza lontano dal lanciatore, quelle porzioni di traiettoria in cui il boomerang passa vicino alla macchina fotografica appaiono esageratamente ingrandite. Nelle traiettorie teoriche corrispondenti si è tenuto conto di questo effetto di prospettiva. Il lettore può decidere da solo se c'è un buon accordo tra teoria ed esperienza. In ogni caso, l'aspetto generale e i dettagli delle traiettorie reali del boomerang sono riprodotti abbastanza bene dalla teoria che ho esposto in questo articolo.

Come migliorare le immagini

Nuovi procedimenti basati sulla teoria ondulatoria e sull'uso di calcolatori permettono di perfezionare la qualità delle lenti e delle immagini da esse formate.

di F. Dow Smith

Poiché le lunghezze d'onda della luce sono brevi, la luce può convogliare una notevole quantità di informazioni. La fedeltà con cui queste informazioni vengono alla fine riprodotte sotto forma di immagini dipende dalle caratteristiche fisiche del sistema ottico che forma l'immagine. In questi ultimi anni la tecnologia ottica ha fatto enormi progressi; la fotografia aerospaziale da altissime quote e le tecniche microfotografiche per la produzione di circuiti integrati sono solo due possibili applicazioni degli eccezionali sistemi ottici attuali. La nuova tecnologia è basata su una teoria unitaria della formazione delle immagini, che combina l'ottica geometrica tradizionale con la teoria ondulatoria della moderna ottica fisica, e porta alla formazione di nuovi programmi matematici eseguiti da calcolatori ad alta velocità.

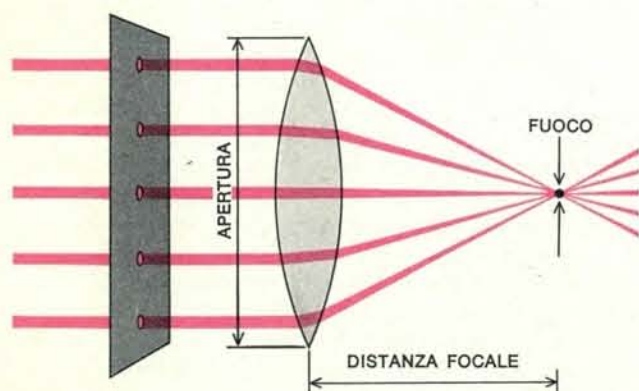
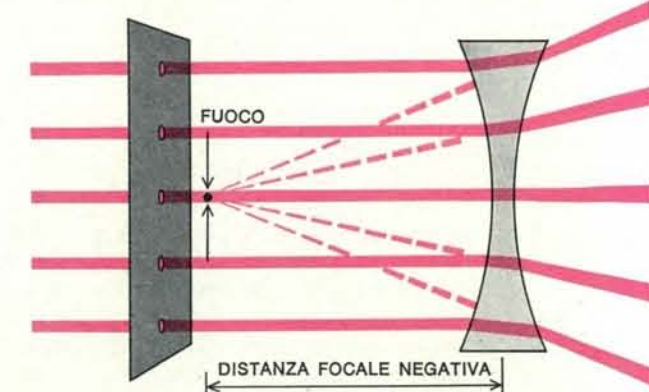
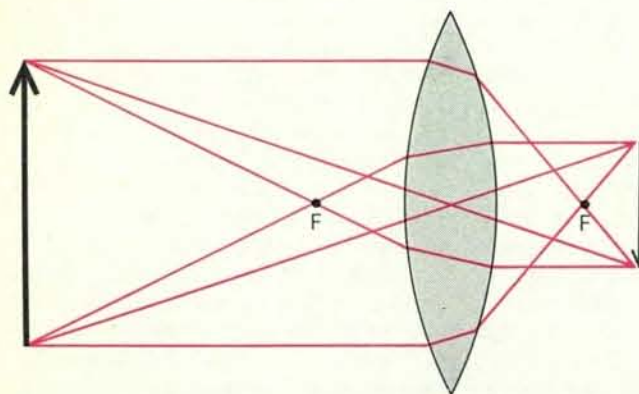
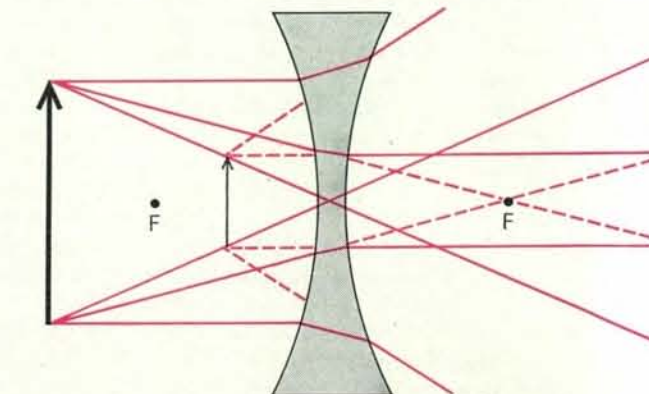
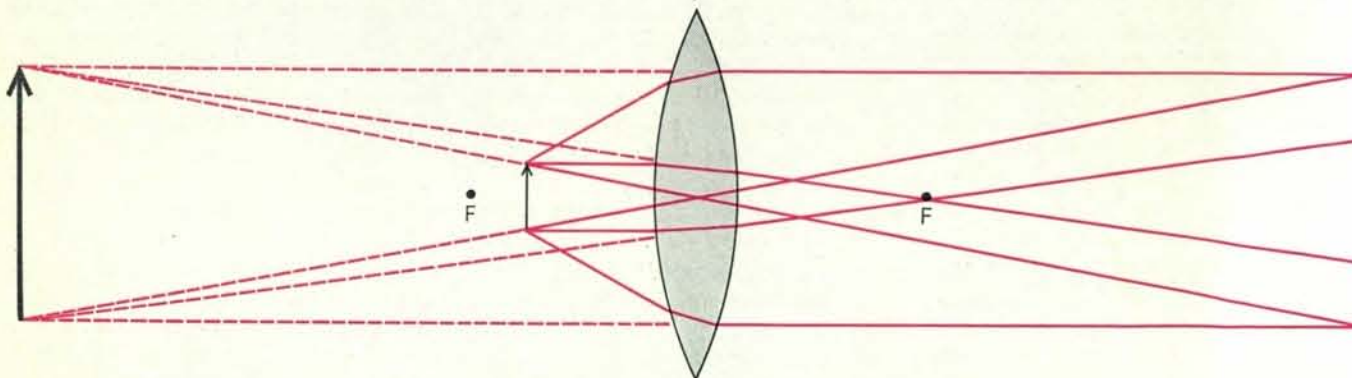
Il comportamento della luce fu uno tra i primi aspetti del mondo fisico a essere osservato e studiato dai filosofi antichi. Costoro impararono sperimentalmente che i raggi luminosi incidenti su una superficie secondo un certo angolo vengono riflessi secondo un angolo esattamente uguale. Piú difficile fu trovare una legge generale per la rifrazione – cioè per il cambiamento dell'angolo che un raggio fòrma con la normale quando passa da un mezzo trasparente a un altro – sebbene verso il 150 d.C. Tolomeo fosse riuscito a misurare il cambiamento di direzione di un fascio luminoso nel passaggio dall'aria all'acqua o al vetro (e nel verso opposto). Keplero scoprí che quando la luce incide quasi perpendicolarmente su una superficie di vetro, gli angoli di incidenza e di rifrazione stanno nel rapporto 3 : 2. Infine nel 1621 il matematico olandese Willebrord Snell trovò la relazione esatta per tutti gli angoli di incidenza, compresi quelli grandi. All'incirca nello stesso periodo Cartesio formulò l'esatta espressione matematica. Isaac Newton dimostrò che l'angolo di rifrazione dipende anche dal colore della luce incidente. Venne cosí stabilita questa semplice relazione geometrica: i seni degli angoli di incidenza e di rifrazione sono inversamente proporzionali agli indici di rifrazione dei due mezzi. Per una luce di qualsiasi colore l'indice di rifrazione di un mezzo è inversamente proporzionale alla velocità di quella luce in quel mezzo. La legge di Snell, come viene chiamata questa relazione, costituisce una base fisica sufficiente per tutta l'ottica geometrica, il cui grande sviluppo alla fine del XIX secolo e all'inizio del XX rese possibili grandi risultati nella progettazione di lenti e strumenti ottici complessi (*si vedano le figure nella pagina successiva*).

Le fotografie nella pagina a fronte mettono in evidenza la grande quantità di informazioni contenute in un'immagine. La striscia a sinistra è uno spezzone di una fotografia scattata ad alta quota a est di Los Angeles con una macchina molto perfezionata per aerofotografie della Itek Corporation. La scala è 1:36 000 (un centimetro corrisponde a 360 metri). La superficie totale è di circa 19 chilometri quadrati. Una piccola porzione di questa fotografia (*poco piú di dieci centimetri dall'alto, lungo la linea mediana verticale*) è stata ingrandita 25 volte e riprodotta a destra con un ingrandimento totale di 31,5 diametri. Nell'ingrandimento si vedono chiaramente le linee di delimitazione di corsia della piscina, i corridori sulla pista e i giocatori sul campo da football.

Dal punto di vista di chi progetta un sistema ottico, la tipica lente per macchina fotografica o per altri strumenti è costituita da un insieme di superfici rifrangenti o riflettenti, solitamente di forma sferica, disposte lungo un asse comune. La « formula » di una lente è costituita da una serie di numeri che danno lo spessore e la spaziatura dei vari elementi e gli indici di rifrazione dei vetri di cui questi sono fatti. Lo scopo è portare fascetti di raggi luminosi da un certo « punto oggetto » in un punto singolo, l'immagine, e di fare ciò per molti punti e per luce di molte lunghezze d'onda.

Non è possibile risolvere in modo semplice un sistema di equazioni algebriche e giungere a una formula completa della lente. Vi sono tuttavia delle formule che esprimono il comportamento generale dei raggi di luce, e in particolare di quelli vicini all'asse della lente, i cosiddetti raggi « parassiali ». Queste formule mostrano che, di solito, non tutti i raggi arrivano allo stesso fuoco, il che produce nell'immagine errori noti come aberrazioni. In un sistema reale non è possibile, e neanche utile, eliminare tutti questi errori. Di solito si accetta invece una determinata quantità di una certa aberrazione e si annulla il suo effetto introducendo un errore uguale e contrario dovuto a un diverso tipo di aberrazione. Le formule calcolate con la teoria dell'aberrazione possono costituire una guida generale per progettare una lente, ma sono molto approssimate.

Per questo motivo, nella progettazione delle lenti si continua a usare il classico metodo di « seguire il percorso del raggio », cioè un procedimento trigonometrico con il quale viene seguito attraverso la lente il percorso di un singolo raggio. Il cambiamento di direzione nel passaggio attraverso ciascuna superficie si calcola mediante la legge di Snell. In questo modo si può determinare il punto in cui ogni raggio interseca il piano in cui si desidera che si formi l'immagine. In un primo tempo in questi calcoli si usavano logaritmi con sei o piú cifre decimali; il procedimento risultava laborioso e si potevano calcolare solo alcuni raggi. In seguito questo procedimento fu reso piú

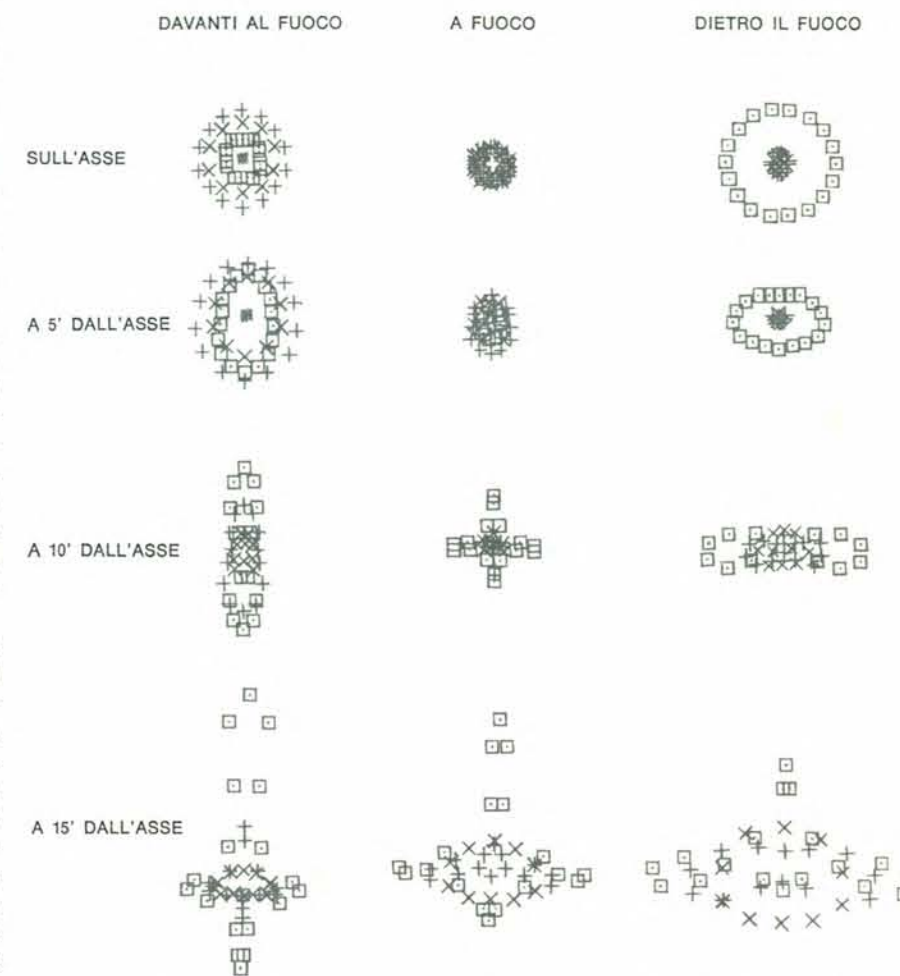
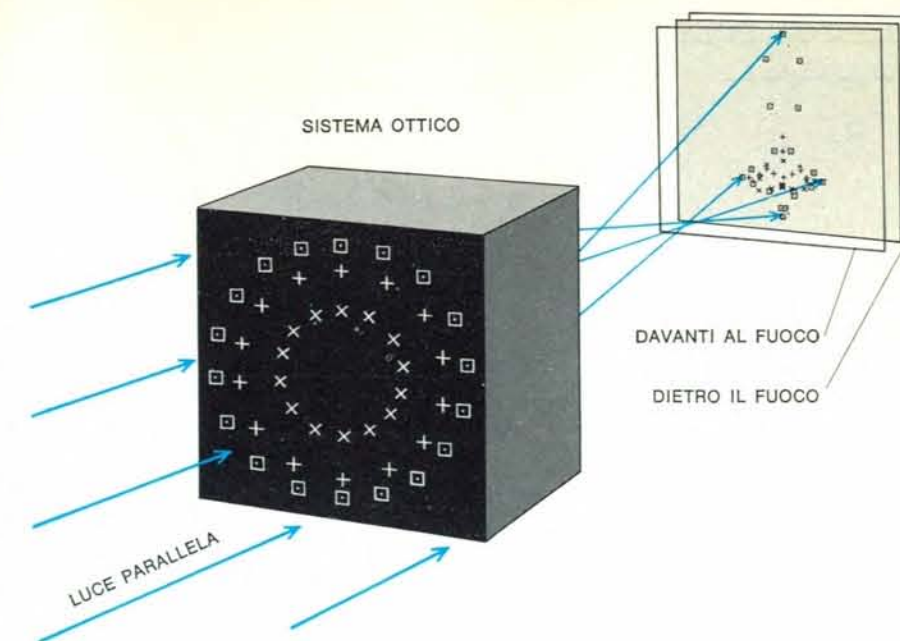
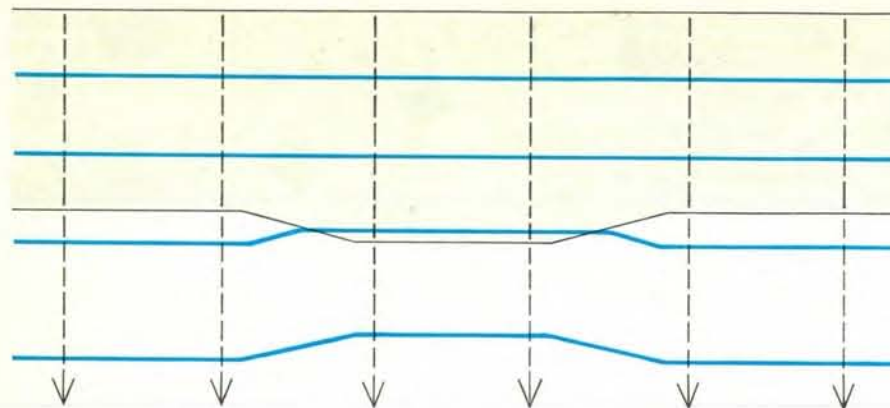
Riflessione e rifrazione quando la luce passa dall'aria (indice di rifrazione 1) al vetro (indice di rifrazione 1,5). L'angolo di riflessione è uguale all'angolo di incidenza e i seni degli angoli di incidenza e di rifrazione sono inversamente proporzionali agli indici di rifrazione (*a*). Invertendo la direzione di propagazione della luce, gli angoli non cambiano (*b*). Un raggio con incidenza radente è rifratto con un angolo limite (*c*). Quando si cambia la direzione, un raggio incidente con un qualunque angolo maggiore dell'angolo limite viene riflesso totalmente entro il mezzo piú denso e non riesce a emergere da questo (*d*).

Raggi paralleli (formati da fori in uno schermo) sono fatti convergere verso il fuoco da una lente convessa, o positiva (*a sinistra*), ma fatti divergere da una lente concava, o negativa, in modo che sembrano aver origine nel fuoco negativo (*a destra*).

I raggi provenienti dai punti di un oggetto (*frecce nere pesanti*), rifratti da una lente, convergono determinando i punti immagine corrispondenti (*frecce grigie*). I raggi paralleli vengono rifratti da una lente sottile e passano per il punto focale (o fuoco); i raggi che si intersecano nel primo punto focale emergono paralleli; i raggi che passano per il centro della lente non sono deviati. Una lente convessa forma un'immagine reale; una lente concava forma invece soltanto un'immagine virtuale.

Si può avere ingrandimento quando un oggetto viene posto tra il fuoco di una lente convergente e la lente stessa. Questa forma un'immagine virtuale, ingrandita e diritta. Nei sistemi ottici composti l'oggetto da ingrandire è a sua volta un'immagine.

veloce con l'introduzione delle calcolatrici meccaniche da tavolo. Il progettista sceglieva un certo numero di raggi uscenti da un singolo punto oggetto e determinava il punto in cui ogni raggio intersecava un piano vicino all'immagine. Ripeteva poi lo stesso procedimento per altri punti nel campo visivo e per luci di varie lunghezze d'onda. Dopo aver fatto una serie di calcoli, egli valutava l'immagine risultante, modificava gli elementi della lente secondo quest'immagine e quindi ripeteva i calcoli.

La progettazione è stata resa molto piú rapida dall'avvento dei calcolatori numerici ad alta velocità, che hanno permesso anche lo sviluppo di un nuovo metodo di visualizzazione, il diagramma dei punti. Con il calcolatore si possono calcolare moltissimi raggi per ciascun punto oggetto. Le interazioni di questi raggi sulla superficie dell'immagine forniscono una figura formata di punti che costituisce l'immagine di quel punto oggetto (*si veda la figura a destra*). Questi diagrammi, costruiti geometricamente, sono buone rappresentazioni dell'immagine quando l'aberrazione è grande, ma tanto migliore è la lente, tanto meno essi sono precisi. Ciò è dovuto ai fenomeni di diffrazione che acquistano un peso relativamente maggiore quando gli effetti di aberrazione sono minori. Con il calcolatore è possibile calcolare in pratica anche l'immagine di diffrazione, ma questo procedimento è scomodo e in generale non è adatto alle applicazioni tecniche. La vera importanza dell'uso dei calcolatori in ottica è stata di aver reso possibile lo sviluppo di nuovi eccezionali procedimenti per la « progettazione automatica delle lenti », procedimenti che possono essere usati anche per le complesse lenti di alta qualità oggi necessarie e usate quasi al limite fisico della diffrazione.

Il problema di chi deve progettare una lente è essenzialmente quello di calcolare le variabili della formula della lente in modo da portare la qualità dell'immagine a un livello prefissato. Dato che una lente può avere 10 o piú elementi, il numero delle variabili che la determinano (curvatura, spessore, spaziatura e qualità del vetro usato per gli elementi) può arrivare fino a 50 o piú. Il numero delle variabili che definiscono la qualità dell'immagine è anch'esso grande perché si deve tenere conto di molti fattori diversi per differenti punti oggetto e per differenti colori della luce.

Il progettista comincia di solito con l'esaminare una configurazione approssimata della lente e quindi modifica metodicamente gli elementi, provando

segue a pag. 56 ⟶

Ecco il diagramma dei punti, costruito con un calcolatore da D.H. Schulter per sperimentare il suo progetto di telescopio da 380 centimetri (150 pollici). Il diagramma mostra come il sistema opererebbe su raggi di luce paralleli che lo attraversassero (provenendo da una sorgente puntiforme lontana) in molti punti diversi, ognuno dei quali è rappresentato da un simbolo nel diagramma schematico (*in alto*). Teoricamente l'immagine dovrebbe essere un punto. In realtà essa varia da un cerchio quasi perfetto (*punto al centro in alto*) con diametro di circa 0,25 secondi (1/14 000 di grado) a figure piú complicate quando il piano dell'immagine viene mosso (*colonne*) e quando l'angolo che i raggi formano con l'asse varia da zero a 1/4 di grado (*righe*).

Ogni imperfezione di una lente si manifesta nel fronte d'onda uscente. In questo diagramma (con una grande sproporzione verticale) un fronte d'onda rettilineo (*in colore*) formato da raggi di luce parallela (*linee tratteggiate*) si muove attraverso un pezzo di vetro piano difettoso e perde la sua forma piana quando incontra un'imperfezione.

man mano i risultati, finché raggiunge la qualità di immagine voluta. Il suo problema è stato paragonato alla condizione di un esploratore, lasciato sull'Himalaya senza carte, al quale venga chiesto di trovare il Monte Everest: può sempre trovare un picco locale arrampicandosi, ma non può mai sapere se esso è il picco piú alto della zona finché non scende in una valle e prova in una nuova direzione – e anche allora i dati in suo possesso sono troppo limitati, non tali da evitargli un'altra ascensione sbagliata. Similmente il progettista, nel suo spazio multidimensionale, può preparare un programma adatto per un calcolatore che cominci con la configurazione di prova della lente e modifichi rapidamente le variabili per trovare l'optimum locale. Se non si raggiunge un optimum sufficiente, i programmi del calcolatore possono muoversi attraverso la « valle » fino a un « picco » molto vicino – cioè a un progetto di lente leggermente diverso. Se però non si trova una soluzione adeguata nelle immediate vicinanze, il progettista stesso può agire in modo da muoversi verso una zona completamente diversa onde trovare una nuova area di soluzioni. I programmi dei calcolatori che possono risolvere questi problemi, preparati da numerosi operatori indipendenti in diverse parti del mondo, sono tra i piú complessi che siano mai stati realizzati. (La complessità deriva soprattutto dal fatto che questi programmi non devono fornire solo una soluzione matematica accettabile, ma una soluzione i cui elementi di lente possano essere effettivamente costruiti.)

Che la progettazione di una lente sia automatica o no, il problema principale resta quello di scegliere le variabili che definiscono la qualità dell'immagine, cioè i termini in cui deve essere descritta la soluzione ottimale. Ciò dipende a sua volta da un'analisi degli oggetti di cui la lente deve fornire le immagini. Parlando del metodo di seguire il percorso del raggio mi riferivo a punti oggetto, e si può in effetti trattare l'immagine di un oggetto esteso come una sovrapposizione di immagini di singoli punti dell'oggetto stesso. Questo è possibile perché si può supporre che ogni punto sia una sorgente di radiazione luminosa indipendente e che la luce proveniente dai vari punti non abbia alcuna relazione di fase, o coerenza. Se l'oggetto è illuminato dalla luce di un laser, la radiazione sarà coerente, ma in questo caso ci si trova di fronte a problemi completamente diversi (si veda l'articolo *Le applicazioni della luce laser* di Donald R. Herriott, in « Le Scienze », n. 5, gennaio 1969).

Se un oggetto può essere considerato come un insieme di sorgenti di luce puntiformi indipendenti, allora è importante esaminare come un sistema di lenti formi l'immagine di una sorgente puntiforme. Infatti, per ragioni intrinsecamente dipendenti dalla natura ondulatoria della luce, un punto oggetto geometrico non può avere come immagine un punto perfetto; tutt'al piú esso può dare una figura di diffrazione di dimensioni finite. Nel caso di una lente ad apertura circolare e priva di aberrazioni, la figura di diffrazione è quella ben nota analizzata dall'astronomo inglese George Biddel Airy nel 1934: un disco luminoso centrale contenente circa l'85 % dell'energia, circondato da anelli equidistanti e sempre meno intensi. Il diametro del disco luminoso è funzione della lunghezza d'onda della luce e del numero f della lente (lunghezza focale divisa per l'apertura). Per esempio una perfetta lente $f/8$ dà un disco di Airy con un diametro di circa 8 micron (millesimi di millimetro). Quando l'aberrazione è stata molto ridotta, la diffusione di ciascun punto luminoso per effetto della diffrazione può diventare il principale fattore di peggioramento della qualità dell'immagine, e deve quindi essere preso in considerazione nella progettazione.

La migliore tecnica di progettazione è quella di considerare ciascun punto oggetto come origine di un'onda che entra nell'apertura del sistema di lenti e è qui convertito in un'onda che esce dalla parte posteriore della lente. Ogni errore nella lente si manifesterà in una deformazione del fronte d'onda uscente, come si può vedere piú chiaramente nel caso di un fronte d'onda rettilineo che attraversa un pezzo di vetro piano (*si veda la figura in alto nella pagina a fronte*). In una lente il fronte d'onda ideale uscente è sferico, col centro di curvatura nel punto immagine (il punto focale, nel caso di un'onda piana incidente da una sorgente distante). In una lente reale vi saranno di solito errori nella sfericità del fronte d'onda uscente. Questi errori sono descritti dall'aberrazione d'onda (W) della lente, funzione che dà, per ogni punto del fronte d'onda uscente, la distanza (generalmente espressa in lunghezze d'onda) tra la superficie d'onda reale e una superficie di riferimento. Un riferimento conveniente è una sfera con centro nell'immagine parassiale, cioè l'immagine formata dai raggi vicini all'asse

Usando un interferometro è possibile misurare, col metodo di Twyman, l'aberrazione d'onda, o errore, di una lente o di uno specchio. La luce deviata dallo specchio semiargentato attraversa la lente e viene poi riflessa dallo specchio. Ogni imperfezione della lente o dello specchio si manifesterà come una deviazione dalla forma piana dei fronti d'onda che vengono riemessi dal sistema lente-specchio. Quando i due fasci si ricombinano i fronti d'onda perfetti provenienti dallo specchio piano (*in alto*) e quelli deformati provenienti dall'elemento in esame interferiscono (*a*) formando frange sulla pellicola (*b*).

La figura di interferenza mostrata in alto è prodotta da uno specchio di 127 centimetri analizzato con un laser secondo il metodo di Twyman modificato. Diverse figure di questo tipo furono analizzate automaticamente e i dati risultanti furono mediati da un calcolatore per tracciare i livelli (*al centro*) e il disegno in prospettiva dell'aberrazione d'onda (*in basso*). Lo « scarto quadratico medio » dell'aberrazione è di 1/34 di lunghezza d'onda, e la massima distanza « da picco a valle » è di 1/6 di lunghezza d'onda.

della lente (*si veda la figura nella pagina a fronte*). Il concetto dell'aberrazione d'onda è fondamentale e, come vedremo, fornisce la piú generale descrizione semplice del funzionamento ottico della lente. L'importanza di questo concetto fu riconosciuta da Lord Rayleigh, che mise in evidenza il fatto che riducendo l'aberrazione a meno di un quarto di lunghezza d'onda spesso non si ottiene un miglioramento della qualità dell'immagine.

Il procedimento di seguire il percorso geometrico di un raggio che ho descritto prima può fornire una determinazione esatta della forma del fronte d'onda uscente, dato che esso è, in ogni punto, perpendicolare al raggio che passa per questo punto. Inoltre la forma del fronte d'onda è il punto di partenza tradizionale e corretto per calcolare la figura di diffrazione. Chiaramente, quindi, il fronte d'onda contiene una descrizione completa dell'immagine, dato che esso si può trovare sia con l'ottica geometrica sia con l'ottica fisica. Fatto ancora piú importante, l'errore sul fronte d'onda di una lente reale o di uno specchio può essere misurato, e ciò permette all'ottico che costruisce l'elemento di conoscere la natura dell'errore nella sua superficie e gli dà di fatto una mappa in cui si vede dove la superficie è troppo alta e dove è troppo bassa. Anche il fronte d'onda prodotto da un sistema completo può essere misurato. Il fronte d'onda collega cosí il lavoro di chi progetta la lente con quello di chi la costruisce.

Per il progettista il fronte d'onda dà il criterio di funzionamento di una lente piú semplice e conveniente, criterio che è anche il piú conveniente per i programmi dei calcolatori. Dal progetto di prova si determinano i valori dell'aberrazione d'onda W rispetto alla sfera di riferimento che meglio approssima il fronte d'onda reale. Questi valori vengono elevati al quadrato per eliminare i numeri negativi, e mediati sull'apertura; la radice quadrata di questa media viene considerata lo scarto quadratico medio dell'aberrazione d'onda. Questo numero risulta ben correlato, nel caso di immagini di alta qualità, alla qualità complessiva dell'immagine. I programmi per la progettazione automatica vengono spesso scritti per ottimizzare il sistema. Ciò si ottiene in particolare cercando di rendere minimo lo scarto quadratico medio.

Per quanto sia possibile considerare un oggetto illuminato da luce incoerente come un sistema di punti da esaminare uno per volta, spesso il progettista trova che è meglio considerare la entrata del suo sistema ottico come un sistema di punti in una configurazione particolare. Abbastanza sorprendentemente, è possibile analizzare l'insieme complesso e irregolare di luci e ombre che costituisce la superficie di un oggetto e prevedere come sarà trasformato in un'immagine da un dato sistema ottico. Base di questo metodo è la « funzione di trasferimento », che è stata sviluppata sul piano teorico durante gli ultimi 20 anni, e che di recente, dopo che sono stati risolti alcuni difficili problemi di calcolo, è diventata praticamente utilizzabile. La funzione di trasferimento descrive la capacità che un sistema ottico ha di formare immagini di una particolare categoria di oggetti estesi: sistemi di sbarrette, illuminate da luce incoerente, ognuna delle quali ha una luminosità variabile sinusoidalmente. Ogni scena fisica può essere considerata come una sovrapposizione di componenti sinusoidali (e può essere analizzata in tali componenti con il procedimento di Fourier), proprio come un suono complesso può essere trattato come sovrapposizione di onde semplici sinusoidali. Si deve quindi poter esaminare come un sistema ottico forma le immagini delle singole componenti di frequenza spaziale, cosí come si descrive la fedeltà con cui un sistema acustico riproduce le onde sonore nella gamma richiesta. La funzione di trasferimento è analoga alla curva di risposta di un sistema acustico in funzione della frequenza.

Un sistema ottico, qualunque siano le sue aberrazioni, forma un'immagine sinusoidale di un oggetto sinusoidale. La immagine ha la stessa frequenza spaziale dell'oggetto (moltiplicata per l'ingrandimento del sistema). Il sistema è cioè lineare. Però, l'immagine non è identica all'oggetto perché in ogni sistema ottico reale vi sarà una certa diminuzione di contrasto: il rapporto luce-oscurità diminuisce perché una parte della luce passa dalle bande luminose a quelle oscure. Questo passaggio aumenta al diminuire dello spazio tra le bande tanto che il contrasto alla fine può tendere anche a zero. Il rapporto tra il contrasto dell'immagine e quello dell'oggetto, che viene posto arbitrariamente uguale a uno per il caso limite di sbarrette infinitamente grosse, dà il valore della funzione di trasferimento per una particolare frequenza spaziale. La funzione di trasferimento è quindi una curva che dà il contrasto dell'immagine in funzione della frequenza spaziale, espressa di solito in cicli di luce e di oscurità per millimetro nel piano dell'immagine (*si veda la figura a pagina 62*).

La funzione di trasferimento fornisce una base per prevedere il funzionamento di un singolo elemento o il funzionamento complessivo di un sistema ottico. Per esempio, in una macchina per aerofotografie la velocità del mezzo di trasporto di solito fa sí che la immagine risulti confusa in misura prevedibile. Il movimento dell'immagine può essere descritto con una funzione di trasferimento che, moltiplicata per la funzione della lente, dà l'esatta funzione della combinazione delle due. Il risultato può essere combinato con la funzione di trasferimento dell'emulsione fotografica per prevedere il funzionamento complessivo del sistema. (Quest'ultimo passo è meno preciso perché la risposta dell'emulsione non è lineare: un'esposizione sinusoidale non sempre produce un'immagine sinusoidale nella emulsione.)

La funzione di trasferimento può essere derivata da una descrizione del fronte d'onda, che può essere sia un fronte d'onda calcolato durante la fase di progettazione sia un fronte d'onda reale misurato in laboratorio. Nel caso di una lente perfetta il calcolo si fa abbastanza facilmente. Quando invece la aberrazione d'onda non è nulla, il calcolo è complicato e richiede un grande calcolatore. Inoltre si devono fare numerosi calcoli dello stesso tipo per diverse orientazioni delle sbarrette sinusoidali in entrata, perché il sistema ottico può rispondere in modo completamente diverso alle diverse orientazioni.

Un metodo piú efficace è quello di ottenere la funzione di trasferimento calcolando prima la distribuzione dell'energia nell'immagine di una sorgente puntiforme, cioè come la luce proveniente da una sorgente puntiforme si distribuisce nell'immagine. Questo procedimento è possibile perché si può considerare la sorgente puntiforme come uniformemente costituita di com-

Un modo per controllare le aberrazioni è quello di combinarle. In un esempio ipotetico (*pagina a fronte*) una lente è stata corretta completamente per aberrazioni cromatiche semplici, ma ciò nonostante il suo fuoco per il rosso e l'azzurro è diverso dal fuoco per il verde (*a, b, c*). Un'altra lente (*d, e, f*) presenta un'aberrazione sferica che varia con il colore della luce. Combinando gli errori delle due lenti, si ottiene una lente con un funzionamento migliore per la luce azzurra (*g, h, i*). I raggi marginali e parassiali sono rappresentati a colori, e i diversi fronti d'onda, anch'essi in colore, sono confrontati con un fronte d'onda di riferimento perfettamente sferico (*in nero*); la linea tratteggiata rappresenta il piano in cui si desidera si formi l'immagine mentre le frecce indicano l'immagine migliore ottenuta da ciascuna lente. Le curve al di sotto di ogni schema danno l'aberrazione d'onda W di ciascuna lente in lunghezze d'onda.

ponenti sinusoidali di tutte le lunghezze d'onda possibili. Quindi, se si scompone l'immagine nelle sue componenti sinusoidali mediante un'analisi di Fourier spaziale, il risultato è la funzione di trasferimento. Recentemente Robert R. Shannon e i suoi colleghi della Itek Corporation, e in particolare Steven H. Lerman e William A. Minnick, hanno elaborato un sistema pratico per fare questi calcoli con metodi di programmazione molto avanzati. Con questo sistema utilizzano un nuovo metodo teorico per calcolare la diffrazione di immagini puntiformi partendo da dati sul fronte d'onda ottenuti in Inghilterra da Harold H. Hopkins, che ora lavora all'Università di Reading. Solo in questi ultimi tempi un nuovo metodo di calcolo rapido delle trasformate di Fourier ha reso possibile eseguire la necessaria scomposizione di Fourier con i calcolatori numerici. È stato anche elaborato un programma che consente ai calcolatori di disegnare automaticamente in prospettiva la distribuzione energetica e la funzione di trasferimento (*si vedano le figure in queste due pagine*).

Come ho sottolineato piú sopra, uno dei grandi vantaggi dei nuovi metodi di progettazione ottica è che essi permettono a chi progetta una lente, e a chi deve valutarne il funzionamento, di parlare la stessa lingua, quella del fronte d'onda. È stato il laser a rendere realizzabili in pratica le misure delle aberrazioni del fronte d'onda per una vasta gamma di lenti, ma il procedimento fondamentale era stato elaborato in Inghilterra piú di 40 anni fa da F. Twyman, che progettò una modificazione dell'interferometro di Michelson. Nel procedimento di Twyman un fascio di luce proveniente da una sorgente monocromatica viene sdoppiato da uno specchio semiriflettente. Uno dei due fasci ottenuti va alla lente in esame e l'altro a una superficie ottica perfettamente piana. Quando i fasci di luce si ricombinano, la loro interferenza produce un insieme di frange che

Le prestazioni di ciascuna delle combinazioni lente-colore della luce schematizzate a pagina 59 sono rappresentate visivamente in questi grafici della distribuzione energetica nelle immagini puntiformi (*a sinistra*) ottenuti per mezzo di un calcolatore. Ognuno di essi è un grafico tridimensionale dell'intensità luminosa (*verticale*) in funzione della distanza nel piano dell'immagine. Un picco stretto significa che l'immagine è buona (*b, e, g, h*). È evidente la grande aberrazione della terza lente nel rosso (*i*). (Le irregolarità piccole, asimmetricamente distribuite, derivano dall'elaborazione del calcolatore).

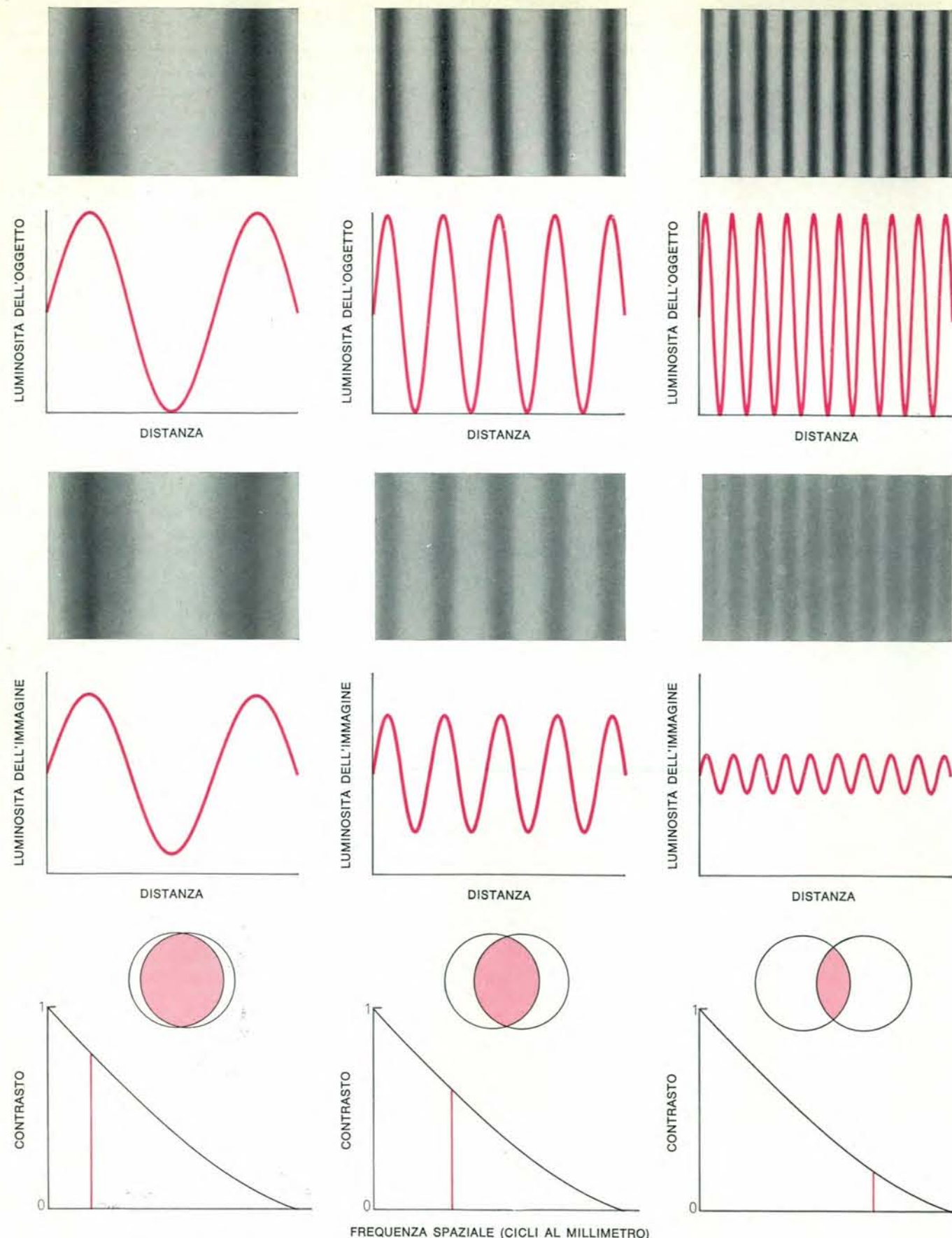
LUMINOSITÀ DELL'OGGETTO

DISTANZA

LUMINOSITÀ DELL'IMMAGINE

DISTANZA

CONTRASTO

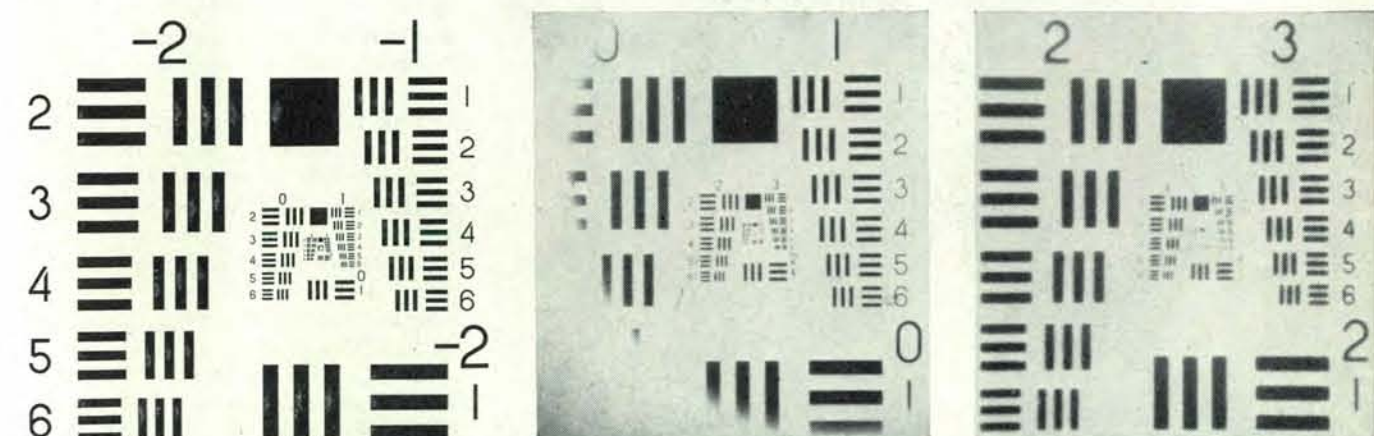
FREQUENZA SPAZIALE (CICLI AL MILLIMETRO)

La funzione di trasferimento, che descrive la capacità di un sistema ottico di mantenere il contrasto, è basata sul cambiamento di contrasto al diminuire degli spazi in un sistema di sbarrette aventi un contrasto variabile sinusoidalmente. Sono rappresentati tre sistemi di questo tipo e le loro curve intensità-distanza (*in alto*) insieme alle loro immagini (*al centro*). Per un sistema perfetto la diminuzione di contrasto è data dalle curve della funzione di trasferimento (*in basso*). Il valore della funzione per ogni frequenza spaziale (rapporto delle ampiezze delle onde sinusoidali rappresentate sopra) è dato dalle linee verticali in colore. Questo rapporto è dato anche dalla regione comune a ogni coppia di cerchi che rappresentano l'apertura.

è direttamente collegato all'aberrazione d'onda W. L'insieme viene interpretato nello stesso modo delle linee di livello su una carta topografica, anche se le distanze tra i livelli sono di mezza lunghezza d'onda e non di qualche metro. (Il fattore un mezzo deriva dal fatto che la luce passa due volte attraverso la lente in esame.)

Prima dell'introduzione del laser, questo metodo aveva parecchi limiti. Dato che per produrre un'interferenza utile i fasci dei due interferometri devono essere in fase, le loro traiettorie non possono differire per piú della lunghezza di un singolo treno d'onda emesso dalla sorgente di luce, alcuni centimetri nel caso di un arco a mercurio puro. Inoltre l'apparecchiatura che si usa per l'esperienza deve essere mantenuta priva di vibrazioni per tutto il tempo di esposizione necessario, e questo è particolarmente difficile nel caso di lenti e specchi grandi. Il laser ha risolto entrambi i problemi. I laser a gas a funzionamento continuo mantengono la coerenza per molti metri e hanno energia sufficiente per permettere una rapida registrazione delle figure di interferenza minimizzando gli effetti delle vibrazioni.

Un limite fondamentale del metodo interferometrico riguarda la possibilità di ricavare dei dati dalla figura di interferenza; in particolare, non è facile determinare la superficie di riferimento da cui si dovrebbe misurare la distanza, dovuta all'aberrazione, del fronte d'onda reale. I grandi calcolatori possono risolvere questo problema. Alla Itek Corporation, per esempio, noi oggi analizziamo automaticamente le figure di interferenza; con i dati cosí ottenuti il calcolatore determina la superficie di riferimento che « meglio approssima » il fronte d'onda reale, avendo la minima separazione media dal fronte d'onda misurato, e poi traccia il grafico degli errori a intervalli di altezza molto minori degli intervalli di una lunghezza d'onda che si hanno con le frange originarie (*si veda la figura a pagina 57*). La mappa del fronte d'onda può essere usata dal tecnico come guida negli stadi successivi della costruzione, per confrontare i suoi risultati col progetto iniziale, per calcolare la funzione di trasferimento o per ottenere altri dati sulla qualità dell'immagine, per esempio l'immagine di una sorgente puntiforme o di soggetti piú complessi. In altri termini, la carta a curve di livello collega tra loro, in modo piú soddisfacente di altri metodi, le varie parti della tecnologia ottica.

Non si deve sottovalutare l'importanza di questo collegamento. La costruzione di uno strumento ottico, per esempio di una macchina per aerofotografie o di un telescopio, passa attraverso numerose fasi. Il progetto complessivo deve fissare le caratteristiche tanto dei componenti meccanici che della lente stessa, tenendo conto delle relazioni con il rivelatore delle immagini (emulsione fotografica, telecamere o fotometro). Per la lente si ha una successione di stadi distinti (progettazione, fabbricazione e prova) ognuno dei quali deve essere attentamente valutato. Sono abbastanza ridotte le aberrazioni della lente che si progetta? È stata abbastanza levigata la lente? La lente montata produce un'immagine abbastanza buona? Il sistema finito produce fotogrammi di prova sulla pellicola con le caratteristiche originariamente richieste? Nel corso degli anni sono stati sviluppati diversi criteri per rispondere a queste domande nei vari stadi, ma questi criteri non potevano essere collegati tra loro con precisione. Ora finalmente l'ottico può sapere con esattezza quando la sua superficie ottica è abbastanza buona e il montatore può sapere con certezza che l'immagine che egli osserva nella lente finita è quella che il progettista aveva previsto.

I nuovi procedimenti che ho descritto costituiscono un'importante trasformazione della tecnologia ottica. Per decine di anni l'ottica è stata in gran parte un'arte, in cui abilità artigianale e intuizione svolgevano ruoli dominanti. Oggi comincia a esistere una base scientifica unitaria per nuovi sviluppi tecnologici. I sistemi ottici avanzati necessari per l'astronomia spaziale saranno i primi a risentire i benefici di questa nuova tecnologia, ma se ne sente già l'influsso nello sviluppo dell'ottica commerciale. Fino a oggi gli elementi ottici in commercio avevano aberrazioni d'onda da una ad alcune lunghezze d'onda. Per questi valori della aberrazione, l'ottica geometrica fornisce una descrizione adeguata del funzionamento di una lente, con luce che, da ogni regione dell'apertura, dà contributi incoerenti all'immagine. Quando l'aberrazione d'onda diventa una frazione di lunghezza d'onda, i contributi provenienti da ciascuna regione della apertura si combinano in modo coerente. A questo punto l'energia sull'immagine comincia a concentrarsi rapidamente e si ha un miglioramento della qualità completamente sproporzionata alla diminuzione di aberrazione. Anche i sistemi ottici commerciali cominciano a operare in questo campo di frazioni di lunghezze d'onda. Le nuove tecniche di calcolo automatico e di misura renderanno realizzabili in pratica sistemi ottici di complessità sempre maggiore con funzionamenti mai raggiunti finora.

Per trovare il potere risolutivo di un sistema lente-pellicola si può sperimentare con la tavoletta mostrata a sinistra in grandezza naturale. I numeri grandi danno le linee per millimetro in potenze di 2; per esempio, 2^0 significa una linea al millimetro, 2^3 otto linee. I numeri piú piccoli indicano misure intermedie. Con un grande obiettivo f/3,5 venivano formate su una pellicola per aerofotografia le immagini (*al centro e a destra*) di parti sempre piú piccole del provino, dopo che queste erano state rimpicciolite di cinque diametri. Al microscopio, l'immagine a destra indica che il sistema risolve quasi 300 linee/mm.

La sintesi del DNA

La sintesi in vitro della doppia elica che controlla i caratteri ereditari ha coronato dopo cinquant'anni il lavoro dei biochimici per riprodurre al di fuori della cellula vivente molecole giganti biologicamente attive.

di Arthur Kornberg

Insieme ai miei collaboratori diedi inizio nel 1954 agli esperimenti di sintesi in vitro degli acidi nucleici impiegando enzimi cellulari. Un anno prima James Watson e Francis Crick avevano proposto il loro modello a doppia elica del DNA, l'acido nucleico che trasmette in tutti gli organismi, fatta eccezione per certi virus, le informazioni genetiche dall'una all'altra generazione.

Il nostro lavoro approdò a un risultato positivo dopo un anno, ma sono stati necessari altri tredici anni per giungere a quella comunicazione, fatta pochi mesi or sono, con la quale riferivamo di aver utilizzato un DNA interamente sintetico dotato della stessa attività biologica del composto naturale e fabbricato usando il DNA naturale come stampo.

Siamo partiti da una forma insolita di DNA a filamento unico che si ritrova nel virus dei batteri ΦX174, ripiegato a formare un anello chiuso. Quando questo virus infetta le cellule del batterio *Escherichia coli* il filamento singolo di DNA funziona come stampo che dirige gli enzimi per la sintesi di una nuova ansa di DNA. Le due anse formano una doppia elica anulare, simile alle eliche di DNA presenti nelle cellule batteriche e negli organismi piú complessi. Nel nostro laboratorio alla Stanford University School of Medicine siamo riusciti dapprima a ricostruire la sintesi, da parte del filamento singolo di DNA, di una copia di DNA virale e infine a ottenere una doppia elica completamente sintetica. Ora ci sembra che sia ormai aperta la via alla sintesi del DNA di altra provenienza: di quello dei virus patogeni per l'uomo, di quello dei batteri e degli organismi pluricellulari; infine del DNA dei vertebrati, e dei mammiferi in particolare.

La doppia elica, il famoso modello dell'acido desossiribonucleico (DNA) proposto nel 1953 da James D. Watson e F.H.C. Crick, risulta costituita da due filamenti collegati da bande trasversali (*in colore*) che trasmettono il messaggio genetico, caratteristico per ogni organismo. Il modello di Watson e Crick metteva in evidenza, per la prima volta, come ogni banda trasversale sia formata da due componenti, chiamati basi, che formano delle coppie obbligate (*si vedano le illustrazioni a pag. 66*). Pertanto ogni filamento della doppia elica e la sequenza delle basi sono complementari dell'altro filamento e delle sue basi; può quindi servire come stampo per guidarne la sintesi.

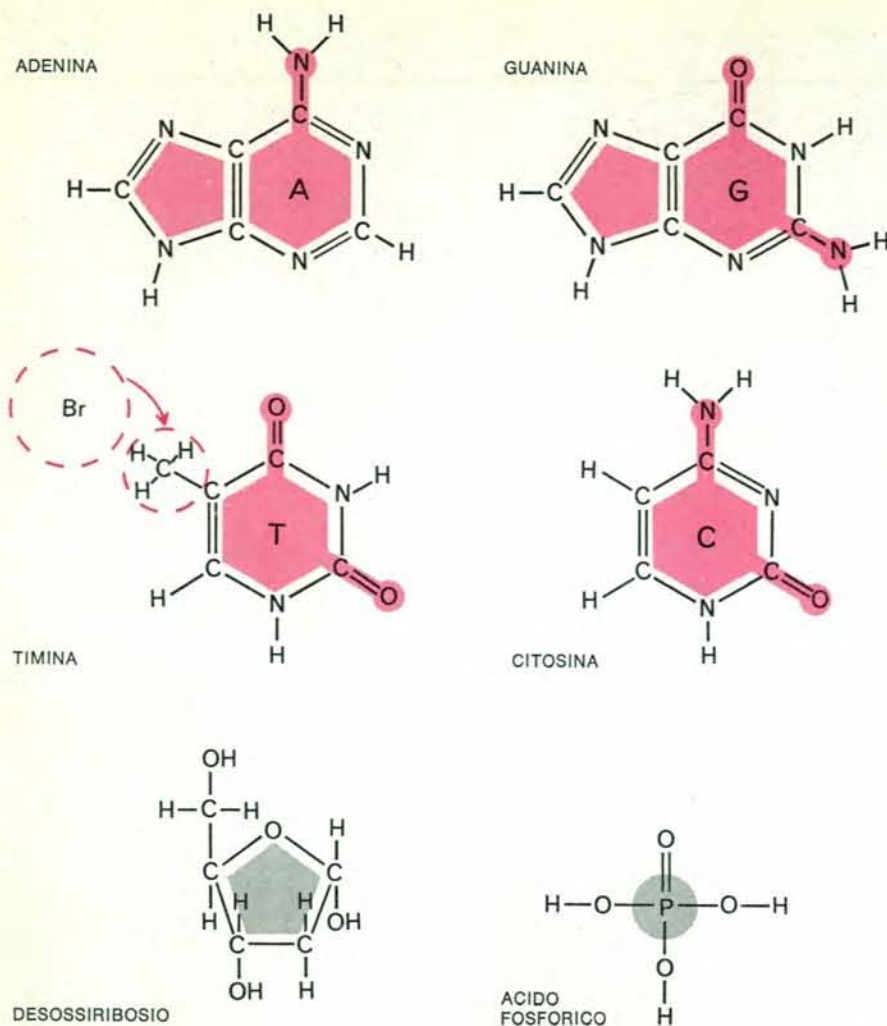
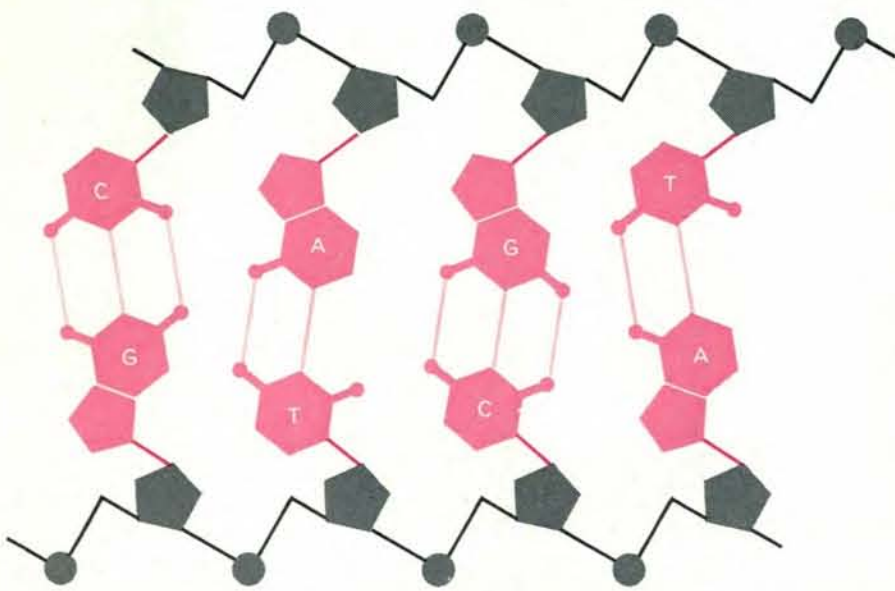
Un passo indietro

La storia della sintesi extracellulare del DNA non comincia nel 1953 con la scoperta della sua struttura. Inizia piuttosto nel 1900 quando i biochimici riuscirono a svelare come la fermentazione dia luogo alla produzione di alcool partendo dai succhi di frutta.

Circa quarant'anni prima Louis Pasteur aveva convinto i suoi contemporanei che le cellule vive del lievito avevano un ruolo fondamentale nel processo della fermentazione. In seguito Eduard Buchner nel 1897 scopriva che un estratto ricavato dalle cellule del lievito aveva la stessa capacità delle cellule intere di trasformare lo zucchero in alcool. È da questa osservazione che ebbe inizio l'era della biochimica moderna.

Durante la prima metà di questo secolo i biochimici hanno potuto stabilire che la trasformazione dello zucchero in alcool si realizza attraverso una serie di quattordici reazioni, ciascuna catalizzata da un enzima specifico. Quando la fermentazione procede in assenza di aria, da ogni molecola di saccarosio derivano quattro molecole di adenosintrifosfato (ATP), il mediatore universale dei processi energetici nelle cellule viventi.

L'energia rappresentata dalla produzione di quattro molecole di ATP per ogni molecola di saccarosio è sufficiente ad assicurare la crescita e la moltiplicazione delle cellule del lievito. Quando la fermentazione si compie a contatto dell'aria l'ossidazione del saccarosio procede oltre e dà, come prodotti terminali, anidride carbonica e acqua con uno sviluppo di energia diciotto volte superiore a quello fornito dal processo di anaerobiosi.

Questa fotografia al microscopio elettronico, eseguita nel laboratorio della Stanford University School of Medicine, mostra tre anelli chiusi di DNA, ognuno costituito da una doppia elica. Un filamento di ogni anello è il filamento singolo del DNA naturale del virus batterico ΦX174 che è stato utilizzato come stampo per la sintesi in vitro, operata dagli enzimi, di un filamento sintetico complementare. La molecola ibrida si è dimostrata biologicamente attiva. L'ingrandimento è di circa 200 000 diametri. Ogni anello contiene all'incirca 5500 coppie di basi e se la figura fosse alla stessa scala del modello riportato nella pagina a fronte ogni anello di DNA di questa fotografia avrebbe una circonferenza di circa una cinquantina di metri.

I componenti del DNA sono quattro basi differenti, desossiribosio (uno zucchero) e acido fosforico. Le basi sono l'adenina (*A*) e la timina (*T*) che formano una coppia obbligata, e la guanina (*G*) che forma un'altra coppia obbligata con la citosina (*C*). Il desossiribosio e l'acido fosforico costituiscono la struttura di ogni filamento della molecola del DNA. Le basi forniscono le lettere in codice del messaggio genetico. Per marcare il DNA sintetico la timina può essere sostituita da un 5' bromouracile che contiene un atomo di bromo mentre la timina contiene un gruppo CH_3 piú leggero.

La struttura del DNA ci ricorda una scala a pioli attorcigliata sul suo asse in cui i portanti laterali sono costituiti da unità alterne di desossiribosio e di acido fosforico mentre i pioli sono formati da basi accoppiate in modo particolare. A è costantemente unita a T e G è sempre unita a C mediante, rispettivamente, due e tre legami di idrogeno.

La comprensione di come il processo di combustione dello zucchero provveda l'energia necessaria per il metabolismo cellulare ha portato a comprendere anche come gli enzimi catalizzino l'ossidazione degli acidi grassi, degli aminoacidi e delle subunità degli acidi nucleici per soddisfare le esigenze energetiche delle cellule. Intorno al 1950 il processo della scissione enzimatica delle grosse molecole era ormai chiarito. Era stato invece trascurato lo studio del meccanismo che le cellule adottano per fabbricare grosse molecole partendo da molecole piú piccole.

In realtà molti biochimici dubitavano che i processi di biosintesi potessero essere riprodotti con successo al di fuori delle cellule. Da allora due decenni sono stati dedicati allo studio della biosintesi extracellulare delle macromolecole, e in particolare almeno due cose sono state chiarite.

Primo: si possono ottenere grosse molecole al di fuori della cellula con l'aiuto di enzimi purificati e di coenzimi.

Secondo: le strade della biosintesi sono diverse da quelle della scissione.

Alcuni biochimici avevano avanzato l'ipotesi che le vie della scissione, a somiglianza delle strade a doppio senso, potessero in qualche modo realizzare le condizioni utili alle reazioni di sintesi. Oggi sappiamo invece che il traffico molecolare nelle cellule scorre su due strade diverse e ben distinte.

Tutte le cellule dispongono di un apparato enzimatico che è in grado di utilizzare sostanze semplici come il glucosio, l'ammoniaca e l'anidride carbonica, per sintetizzare le subunità costitutive delle macromolecole. Le cellule hanno inoltre la capacità di custodire, impedendone la demolizione, le subunità una volta che queste siano formate e diventino disponibili. Sulla base di quanto abbiamo appreso possiamo prevedere che i biochimici riusciranno nel corso di questo secolo a sintetizzare in vitro virus complessi e i piú importanti componenti della cellula.

Forse il secolo venturo ci darà la sintesi di una cellula completa.

I nucleotidi

I primi esperimenti per la sintesi in provetta dell'acido nucleico furono intrapresi dal nostro gruppo quando eravamo alla Washington University di S. Louis. A quel tempo i costituenti degli acidi nucleici erano già noti (*si veda l'illustrazione a sinistra*).

Se si considera il DNA come una catena formata da strutture che si ripetono, la struttura fondamentale è rappresentata da un nucleotide (*si veda l'illustrazione in questa stessa pagina*) che consiste di un fosfato unito a uno zucchero a cinque atomi di carbonio, il desossiribosio, il quale a sua volta è legato a una delle quattro differenti basi contenenti azoto.

Le quattro basi sono l'adenina (A), la timina (T), la guanina (G) e la citosina (C). Nella doppia elica del DNA le unità di fosfato e di desossiribosio si alternano a formare i portanti laterali di una scala attorcigliata lungo il suo asse e i cui pioli sono costituiti ciascuno da una coppia di basi, coppia obbligata in quanto A è costantemente legato a T e G sempre a C. Questo particolare appaiamento è stato la chiave rivelatrice del modello prospettato da Watson e Crick. Se infatti i due filamenti dell'elica vengono separati, dividendo le basi della coppia, ognuna delle due metà può servire di stampo per ricostruire la metà mancante. Pertanto, se le basi che si incontrano in uno dei filamenti si susseguono nell'ordine A, G, G, C, A, T..., possiamo affermare con certezza che le basi complementari sull'altro filamento mancante sono T, C, C, G, T, A... Questo meccanismo di appaiamento delle basi permette alla cellula di riprodurre copie esatte della molecola del DNA ogniqualvolta la cellula si divide.

Quando le subunità di un filamento del DNA vengono separate le une dalle altre (mediante trattamento con acidi o con particolari enzimi) l'acido fosforico dei nucleotidi può risultare unito al terzo atomo di carbonio dello zucchero desossiribosio (che contiene cinque atomi): questa struttura è detta 3'-nucleoside monofosfato. Secondo noi, però, le unità che meglio si prestavano alla sintesi dovevano essere i 5'-nucleosidi monofosfati nei quali l'acido fosforico è legato al 5° atomo di carbonio del desossiribosio. Questa opinione era confortata da due elementi dimostrativi. Il primo era emerso dalla delucidazione del meccanismo utilizzato dalla cellula per fabbricare i nucleotidi a partire dal glucosio, dall'ammoniaca, dall'anidride carbonica e dagli aminoacidi.

John M. Buchanan del Massachusetts Institute of Technology aveva dimostrato che i nucleotidi contenenti le basi A e G erano sintetizzati in natura con l'acido fosforico legato al carbonio n. 5. Le nostre ricerche avevano messo in evidenza che altrettanto accade per i nucleotidi contenenti T e C.

La seconda prova dimostrativa ci veniva dall'aver accertato, nel corso di precedenti ricerche al National Institute of Health, che certi coenzimi costituiti da semplici molecole formate da due nucleotidi, venivano elaborati partendo da unità in cui l'acido fosforico era legato al carbonio 5. Per realizzare il legame enzimatico l'acido fosforico del nucleotide doveva essere attivato da altri gruppi fosforici (*si veda l'illustrazione alla pagina seguente*). Sembrava pertanto logico che i 5'nucleotidi attivati (nucleosidi 5'trifosfati) potessero combinarsi gli uni con gli altri, sotto un opportuno controllo enzimatico, per formare le catene dell'acido nucleico.

L'unità base del DNA è un monomero e precisamente un nucleotide. Dall'unione di tali monomeri derivano i polimeri del DNA. Quattro sono i nucleotidi, ognuno contenente una base diversa A, T, G e C. Nella figura è riprodotta la desossiadenosina 5' fosfato che è il nucleotide contenente adenina. Quando il gruppo fosforico è sostituito da un atomo di idrogeno il composto cambia nome e si chiama nucleoside.

In principio i nostri tentativi per sintetizzare l'acido nucleico poggiavano essenzialmente su due tecniche. La prima comportava l'uso di nucleotidi marcati con isotopi radioattivi cosicché era possibile evidenziarli quando venivano incorporati nell'acido nucleico anche in minime quantità.

Studiammo negli estratti di timo, di midollo osseo e di cellule batteriche il meccanismo enzimatico che sintetizza gli acidi nucleici. Purtroppo tutti questi estratti possiedono in alto grado anche la capacità di scindere gli acidi nucleici. Aggiungemmo i nostri nucleotidi marcati a un complesso di acidi nucleici nella speranza che qualcuna delle molecole sintetizzate contenenti il nucleotide marcato potesse rimanere intatta nell'insieme degli acidi nucleici. Anche se si fosse verificata una notevole degradazione, la sintesi di alcune molecole inglobate nel complesso degli acidi nucleici avrebbe potuto ugualmente essere evidenziata.

La seconda tecnica si avvaleva della circostanza che rendendo molto acido il mezzo, l'acido nucleico precipita, mentre i nucleotidi precursori rimangono nella soluzione.

I nostri primi esperimenti con estratti di cellule animali dettero costantemente risultati negativi. Usammo allora lo *Escherichia coli* che ha il pregio di riprodursi ogni venti minuti e, a questo punto, cominciammo a intravedere uno spiraglio di luce.

Nei campioni dove avevamo aggiunto una notevole quantità di nucleotidi marcati, i cui atomi radioattivi si disintegravano alla velocità di un milione al minuto, rilevammo all'incirca cinquanta disintegrazioni al minuto nelle frazioni di acido nucleico che veniva precipitato dall'acido. Sebbene la quantità di nucleotidi incorporati nell'acido nucleico fosse minima, era tuttavia decisamente al disopra dell'errore causato dalla normale radioattività.

Attraverso questo spiraglio cercammo di aprirci un varco e a questo scopo ricorremmo alla purificazione enzimatica, una tecnica che era stata perfezionata nel corso delle ricerche sulla fermentazione alcoolica.

La DNA polimerasi

Durante questi esperimenti Uriel Littauer, un borsista del Weizmann Institute di Israele, e io avevamo osservato che l'adenilato (un nucleotide) viene incorporato dall'ATP nell'acido ribonucleico (RNA) nel quale lo zucchero a

cinque atomi di carbonio che struttura la catena è ribosio anziché desossiribosio.

In realtà la prima chiara dimostrazione della sintesi di una molecola simile a quella dell'RNA in un sistema extracellulare era stata raggiunta nel laboratorio di Severo Ochoa nel 1955.

Mentre lavorava con Marianne Grunberg-Manago alla New York University School of Medicine intorno ad un particolare aspetto del metabolismo energetico, accadde ad Ochoa di osservare imprevedibilmente che uno dei reagenti, l'adenosindifosfato (ADP), era stato polimerizzato dagli estratti cellulari in una catena di molecole di adenilati che rassomigliava all'RNA.

Nei nostri primi esperimenti per realizzare la sintesi extracellulare del DNA abbiamo usato il desossiribonucleoside chiamato desossitimidina. Sono grato a Morris E. Friedklin, che si trovava allora alla Washington University, non solo per averci fornito il composto marcato, ma anche per averci informato che questo veniva rapidamente incorporato nel DNA dalle cellule del midollo osseo e da altre cellule animali.

Nutrivamo fondate speranze che gli estratti di *Escherichia coli* sarebbero riusciti a incorporare la desossitimidina nell'acido nucleico trasformandola dapprima in 5'desossinucleotide e attivandolo poi il desossinucleotide nella forma di trifosfato. Cosí in effetti avvenne.

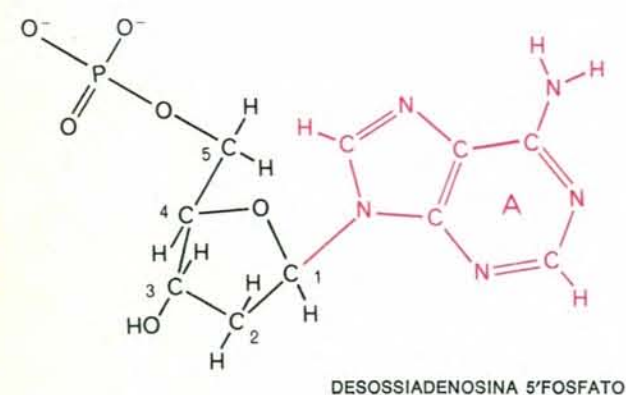
Nei mesi seguenti Ernst Sims ed io stesso riuscimmo a ottenere separatamente sia la desossitimidina 5'trifosfato, sia gli altri desossinucleosidi trifosfati usando delle vie di sintesi enzimatiche e chimiche. (Nel seguito dell'articolo i vari desossinucleosidi nella loro forma di 5'trifosfati saranno indicati semplicemente con l'iniziale della base contrassegnata da un asterisco. Pertanto la desossitimidina 5'trifosfato sarà indicata con T*.)

Nel novembre del 1955 J. Robert Lehman, che attualmente si trova a Stanford, dette inizio alla purificazione del sistema enzimatico contenuto negli estratti di *Escherichia coli* e capace di trasformare la T* in DNA. Al nostro gruppo si unì alcune settimane piú tardi Maurice J. Bessman. Furono giorni importanti durante i quali l'enzima, a cui oggi viene dato il nome di DNA polimerasi, venne progressivamente separato da altre grosse molecole. A ogni passo del processo di purificazione le caratteristiche di questa reazione sintetica del DNA si facevano sempre piú chiare.

Quando nel giugno del 1956 partecipammo ad una conferenza sulle basi chimiche dell'eredità alla Johns Hopkins University, potemmo comunicare due notevoli risultati sulla sintesi in vitro del DNA anche se molti problemi importanti non erano stati a quel tempo risolti. Riferimmo in primo luogo che per la sintesi del DNA deve essere presente del DNA preformato insieme con la DNA polimerasi e che tutti e quattro i desossinucleotidi contenuti nel DNA (A, G, T e C) debbono trovarsi nella forma attivata di trifosfati. Dicemmo inoltre che con l'enzima dell'*Escherichia coli* può essere usato del DNA proveniente praticamente da qualsiasi fonte: virale, batterica o animale.

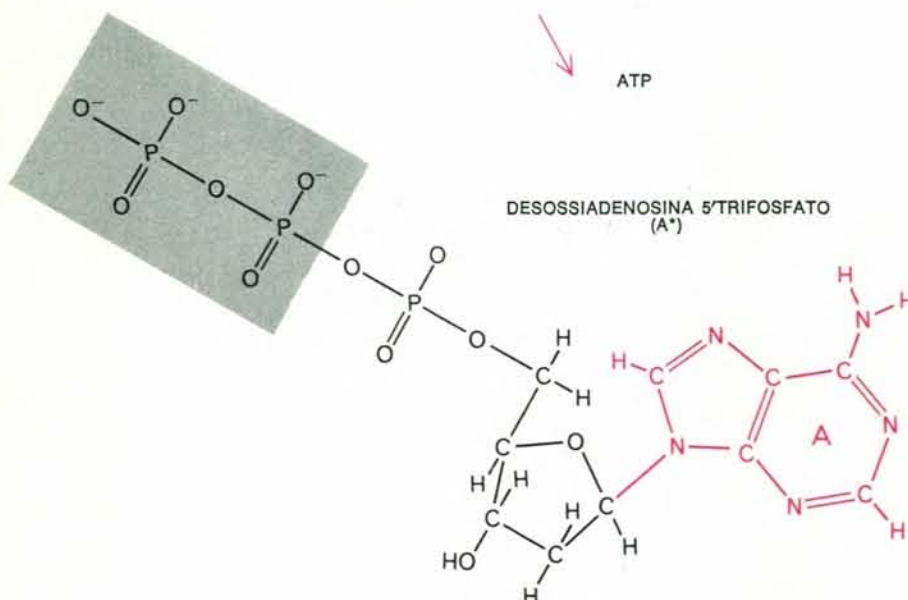
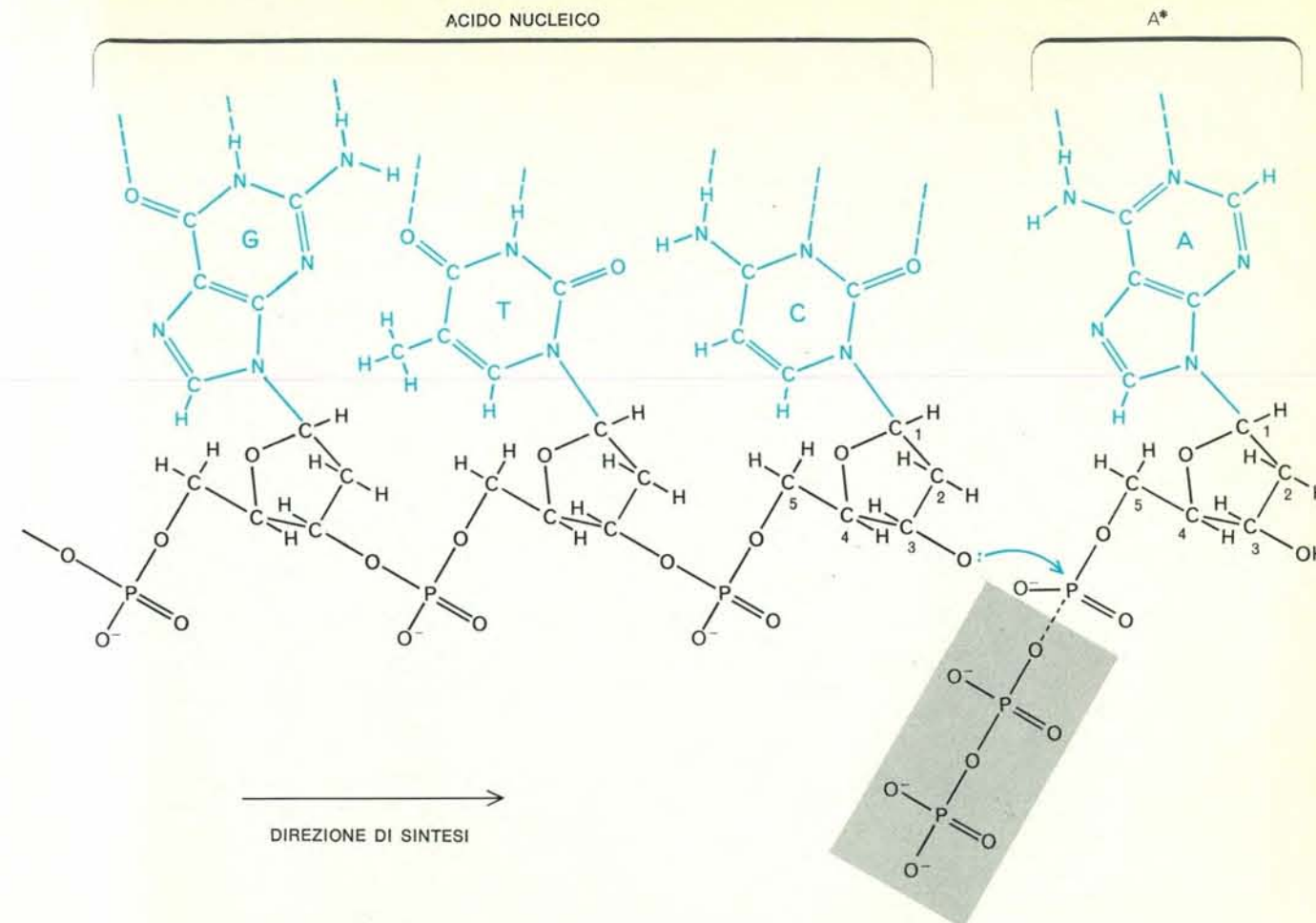
Tuttavia non eravamo ancora riusciti ad accertare se il DNA sintetico rappresentava una nuova molecola o l'allungamento di una molecola preesistente.

Ma c'erano altri problemi ai quali non avevamo dato una risposta. Il DNA sintetico aveva la stessa natura chimica e la stessa struttura fisica del DNA naturale? Era caratterizzato dalla stessa composizione del DNA naturale in cui il numero di A è uguale a quello di T e il numero di G è uguale a quello di C, cosicché A + G deve risultare uguale a T + C? E infine, punto cruciale della questione, la composizione chimica del DNA sintetico rispecchiava fedelmente quella del particolare tipo di DNA utilizzato per guidare la reazione?

Nei tre anni seguenti tali problemi e altri con questi strettamente connessi furono risolti da Julius Adler, Sylvy Kornberg e Steven B. Zimmerman.

DESOSSIADENOSINA 5'FOSFATO

ATP

ATP

DESOSSIADENOSINA 5'TRIFOSFATO (A*)

Subunità attivate sono necessarie per la sintesi del DNA guidata da uno stampo di DNA naturale e operata dagli enzimi. La forma attivata del nucleotide contenente adenina è la desossiadenosina 5'trifosfato, indicata nel testo con A*, che viene fabbricata a partire dalla desossiadenosina 5' monofosfato da due diversi enzimi attraverso due fasi successive. A ognuna di queste fasi corrisponde la cessione di una molecola di acido fosforico terminale da parte del composto adenosintrifosfato (ATP).

La sintesi del DNA implica la graduale aggiunta di nucleotidi attivati alla catena del polimero in via di accrescimento. In questa figura la desossiadenosina 5'trifosfato (A*) si unisce mediante un legame fosfodiestere che si stabilisce tra il carbonio 3' del desossiribosio dell'ultimo nucleotide della catena e il carbonio 5' del desossiribosio del nuovo elemento che si viene ad aggiungere.

Venne dimostrato che il DNA sintetico era una molecola con la struttura tipica del DNA naturale e che il rapporto tra le coppie A-T e G-C era, nel composto sintetico, dello stesso ordine riscontrato nel particolare DNA naturale che era stato impiegato per avviare o guidare la reazione (*si veda l'illustrazione a pagina 70*).

La quantità dei quattro desossinucleosidi trifosfati immessi inizialmente nella reazione non influenzava in alcun modo la composizione del nuovo DNA che si produceva. La composizione del DNA sintetico era determinata soltanto dalle caratteristiche proprie del DNA usato come stampo.

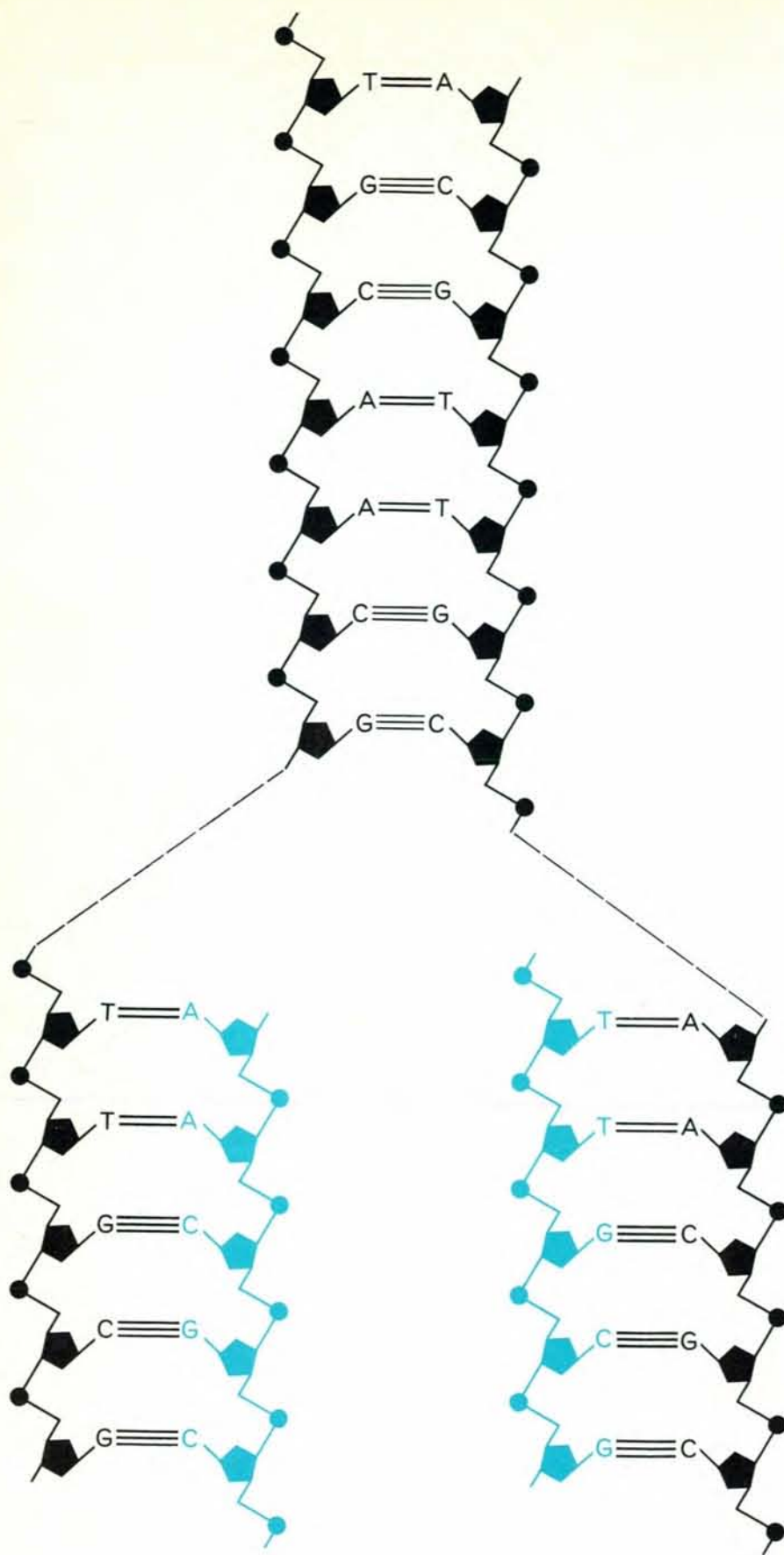
L'illustrazione di quest'ultimo fatto merita una breve digressione. Howard K. Schachman dell'Università di California a Berkeley trascorse nel 1957-1958 il suo anno sabbatico presso di noi alla Washington University esaminando le proprietà fisiche del DNA sintetico e trovò che esso possedeva un'elevata viscosità, una velocità di sedimentazione relativamente bassa e altre proprietà fisiche che sono proprie del DNA naturale. Il DNA sintetico, come quello naturale, era quindi costituito da un lungo polimero fibroso e quanto piú si prolungava l'incubazione della miscela degli ingredienti attivi, tanto maggiore risultava la viscosità del prodotto: questa era la prova evidente che il DNA sintetico continuava a crescere in lunghezza e in quantità.

Rimanemmo tuttavia sconcertati quando un giorno ci accadde di scoprire che la viscosità si sviluppava anche in una provetta dove mancava uno dei composti essenziali e precisamente G*. Nessuna reazione era stata sicuramente osservata nel periodo standard di incubazione della durata di un'ora o due: eppure, prolungando il periodo d'incubazione per parecchie ore, la sostanza viscosa compariva.

L'analisi di questa sostanza dimostrò che si trattava di un DNA contenente solo i nucleotidi A e T che si erano disposti in sequenza perfettamente alterna. Il polimero isolato che chiamammo dAT si comportava come tutti gli altri DNA nel guidare la sintesi di nuove molecole di DNA: esso determinava infatti la sintesi immediata di nuovo polimero dAT. Ci domandammo se G* e C* sarebbero stati polimerizzati qualora in una sintesi guidata dal polimero dAT questi nucleotidi fossero stati presenti nelle stesse proporzioni, o anche in quantità superiori a quelle di A* e di T*. Non riuscimmo però a evidenziare tracce di incorporazione di G o di C neppure in condizioni sperimentali che ci avrebbero permesso di rilevare l'inclusione di un solo G per ogni centomila nucleotidi A o T polimerizzati.

Pertanto la DNA polimerasi raramente, o addirittura mai, commette l'errore di accoppiare G o C con A o con T.

Il DNA di un cromosoma è costituito da una serie lineare di numerosi geni. Ogni gene, a sua volta, è formato da una catena di circa mille nucleotidi che si susseguono in una sequenza ben definita che « tradotta » in aminoacidi detta la sintesi di una particolare proteina o di un particolare enzima.

Riesce la DNA polimerasi, quando realizza la sintesi in vitro del DNA, a copiare esattamente la sequenza dei nu-

La sintesi della doppia catena del DNA produce due molecole ibride costituite da un filamento progenitore e da un filamento generato, identiche tra loro e alla doppia molecola originale. Nel corso del processo di sintesi la doppia molecola progenitrice (*in nero*) si divide in due filamenti ognuno dei quali serve come stampo per il filamento generato (*in colore*). L'accoppiamento di A con T e di G con C garantisce la fedeltà del prodotto.

cleotidi attraverso l'appaiamento delle basi (A = T, G = C) senza compiere errori di accoppiamento, di omissione, di esecuzione, di trasposizione? Purtroppo non disponiamo di tecniche adeguate per determinare la precisa sequenza dei nucleotidi neppure in una corta catena di DNA. Vista l'impossibilità di controllare la sequenza delle basi sia nel DNA naturale che in qualsiasi copia di esso, ci siamo affidati ad altre due tecniche per accertare la fedeltà osservata dalla DNA polimerasi nel ricopiare il DNA usato come stampo. Una di queste tecniche è quella della cosiddetta analisi del « prossimo vicino » e l'altra consiste nella duplicazione dei geni dotati di attività biologica dimostrabile.

L'analisi del « prossimo vicino »

Questo metodo ideato da John Josse, da Dale Kaiser e da me personalmente nel 1959 serve a determinare la frequenza relativa con la quale due nucleotidi vengono a trovarsi affiancati in una molecola di DNA sintetico. Ci sono, in tutto, sedici possibili combinazioni. Esistono cioè quattro possibili combinazioni di prossimo vicino per A (AA, AG, AT e AC), quattro per G (GA, GG, GT e GC) e quattro rispettivamente per T e per C.

Come si può determinare la frequenza di queste sequenze dinucleotidiche in una catena di DNA sintetico? Il procedimento consiste nell'usare un trifosfato marcato con un atomo di fosforo radioattivo quando si opera la sintesi e nel trattare poi il DNA sintetico con un enzima specifico che scinde il DNA lasciando l'atomo di fosforo radioattivo legato al suo prossimo vicino. Se, per esempio, la sintesi del DNA viene eseguita con A* marcato nel fosfato piú interno, gruppo che sarà incluso nel DNA finale, sappiamo che questo fosfato si lega normalmente (10^{16} volte in un esperimento tipo) col suo prossimo vicino che è il nucleotide che gli sta accanto nella catena (*si veda l'illustrazione a pagina 72*). Quando il DNA sintetico viene isolato e sottoposto al processo di degradazione per opera di un enzima che scinde tutti i legami tra il carbonio 5′ del desossiribosio e il fosfato, l'atomo di fosforo radioattivo rimane attaccato al vicino nucleotide anziché a quello (A) a cui in origine era unito.

I nucleotidi derivanti dalla degradazione del DNA vengono facilmente separati mediante elettroforesi o cromatografia su carta nei quattro tipi dai quali il DNA risulta composto e cioè A, G, T e C. Mediante la determinazione della radioattività di ciascuno di questi nucleotidi siamo immediatamente in grado di indicare la frequenza con la quale A si trova accanto ad A, a G, a T e a C.

Ripetendo completamente l'esperimento con G* marcato potremo riconoscere la frequenza con cui ricorrono i dinucleotidi GA, GG, GT e GC. Due ulteriori prove con T* e con C* radioattivi completano l'analisi e stabiliscono le sedici possibili frequenze del prossimo vicino. Diversi esperimenti di questo tipo furono eseguiti usando come stampo DNA isolato da virus, batteri, piante e animali. Il DNA di ogni specie promuoveva la sintesi di DNA che possedeva specifici rapporti nelle frequenze di accoppiamento. Inoltre quando il DNA sintetico veniva usato come stampo per una nuova replica dava origine a un DNA caratterizzato da un'identica distribuzione di frequenza del prossimo vicino.

Da questa analisi emerse, tra l'altro, un fatto di fondamentale importanza sulla struttura della doppia elica. Durante la replicazione la direzione della catena del nuovo DNA sintetizzato decorreva in senso inverso a quello dello stampo. Per analogia potevamo concludere che le catene della doppia elica del DNA naturale, come già avevano supposto Watson e Crick, dovevano decorrere in senso opposto l'una rispetto all'altra.

L'analisi della frequenza del prossimo vicino, anche se eseguita con la massima cura, non può fornire un risultato con un'approssimazione superiore al 98 %. Pertanto ci restavano molti dubbi soprattutto per quanto riguardava le copie delle catene che contengono mille e piú nucleotidi, quali sono appunto quelle dei geni.

Un importante problema rimaneva poi ancora senza risposta: il DNA sintetizzato sulla guida di un DNA biologicamente o geneticamente attivo ne riproduce anche l'attività biologica?

Un metodo per controllare l'attività biologica del DNA batterico consiste nell'osservare se è capace di produrre delle « trasformazioni » che sono un processo mediante il quale il DNA di una specie di batteri modifica il patrimonio genetico di un'altra specie. Per esempio il DNA di un ceppo di *Bacillus subtilis* resistente alla streptomicina può essere assimilato da un ceppo sensibile all'antibiotico. In conseguenza di questo fenomeno il batterio ospite e tutti i suoi discendenti acquisiscono il carattere della resistenza alla streptomicina. In altri termini le molecole del DNA che trasportano i geni di un particolare carattere possono essere identificate in base alla loro capacità di essere assimilate nel cromosoma di una cellula che in precedenza mancava di quel carattere.

Orbene, quando il DNA era sintetizzato sullo stampo di un DNA capace di determinare delle trasformazioni, invariabilmente il DNA sintetico aveva dimostrato di non possedere tale capacità.

Alcune delle difficoltà per la sintesi del DNA biologicamente attivo derivavano dalla persistenza di tracce di nucleasi nei nostri preparati di DNA polimerasi. Le nucleasi sono degli enzimi che scindono il DNA e basta una scissione, prodotta dalla nucleasi nella lunga catena del DNA, per distruggerne l'attività genetica. Si rendeva quindi necessaria un'ulteriore purificazione della DNA polimerasi.

Dopo molti anni di assidue ricerche Charles C. Richardson, Thomas Jovin, Paul T. Englund e LeRoy L. Bertsch misero a punto un nuovo procedimento che era al tempo stesso semplice e efficace. Finalmente nell'aprile del 1967 con l'aiuto del personale e della attrezzatura su larga scala del New England Enzyme Center (istituito dai National Institutes of Health presso la Tufts University School of Medicine) riuscimmo a trattare cento chilogrammi di pasta batterica di *E. coli* ottenendo circa mezzo grammo di enzima puro, privo cioè di quelle nucleasi che scindono a caso la catena del DNA.

Purtroppo anche questo DNA altamente purificato si dimostrò incapace di produrre un DNA biologicamente attivo a partire da uno stampo di DNA batterico. Riteniamo che l'ostacolo sia rappresentato dal fatto che il DNA proveniente da un batterio come il *Bacillus subtilis* fornisca all'enzima uno stampo troppo scadente. Uno stampo appropriato potrebbe essere il cromosoma naturale che risulta costituito da due catene che formano un anello della circonferenza di circa un millimetro. Durante il procedimento di estrazione dal batterio questo cromosoma però si spezza, probabilmente a caso, in piú di cento frammenti.

Il problema del meccanismo con cui la DNA polimerasi e gli enzimi cointeressati riescono a realizzare la replica di una molecola di DNA cosí grande e complessa come è quella del cromosoma del *Bacillus subtilis* è attualmente argomento di ricerche in molti laboratori.

Il virus ΦX174

Nel 1964 ci accorgemmo che il problema della sintesi del DNA biologicamente attivo poteva essere risolto utilizzando una forma piú semplice di DNA, dotato però di attività genetica. Questa forma di DNA è presente nei virus, per esempio nel ΦX174, in cui si trova sotto forma di una catena singola chiusa ad anello. Si tratta di un « cromosoma » che non solo è di struttura piú semplice, ma è anche cosí piccolo da poter essere facilmente estratto senza provocare rotture della molecola.

Venimmo anche a sapere dai lavori di Robert L. Sinsheimer del California Institute of Technology che quando il DNA del ΦX174 infetta l'*E. coli*, durante il primo stadio dell'infezione si verifica nel batterio ospite un « sovvertimento » di uno dei suoi enzimi che produce la trasformazione del singolo anello a filamento semplice in un anello costituito da due catene avvolte ad elica. Sinsheimer aveva dato il nome di « forma replicativa » al prodotto di questo primo stadio. Potrebbe questo enzima dell'ospite che copia il DNA virale identificarsi con quella DNA polimerasi che avevamo isolato dall'*E. coli*?

Nell'affrontare il problema di riprodurre un anello di DNA prevedevamo una serie di gravi difficoltà. Per esempio poteva la DNA polimerasi iniziare la replica guidata da uno stampo che non ha un inizio e una fine?

Shashanka Mitra e in seguito Peter Reichard riuscirono a realizzare le condizioni in cui l'enzima, a quanto risultava dalle fotografie eseguite al microscopio elettronico, sembrava stesse copiando l'anello a catena singola. Ma noi ci domandammo se nonostante le apparenze documentate dalle fotografie al microscopio elettronico, si trattava veramente di un semplice anello o piuttosto, come era stato suggerito da altri, di una specie di collana chiusa da un fermaglio fatto di sostanze che non avevano alcun rapporto con i nucleotidi che fornivamo. Sapevamo infine dalle ricerche di Sinsheimer che il DNA del ΦX174 doveva essere un anello perfettamente chiuso per manifestare il suo potere infettante, mentre la nostra polimerasi risultava capace di catalizzare solo la sintesi di molecole lineari di DNA. Come potevamo dunque riuscire a sintetizzare un anello chiuso appropriatamente? Eravamo in dubbio sugli eventuali componenti da inserire nel sistema per riprodurre il fermaglio o, nel caso che l'ipotesi del fermaglio fosse errata, sulla natura dell'enzima capace di saldare l'anello.

Per fortuna il fattore mancante ci fu rivelato dalle ricerche condotte indipendentemente in cinque diversi laboratori. Nel 1966 un enzima capace di saldare i polinucleotidi venne scoperto quasi nello stesso tempo da Martin F. Gellert e collaboratori ai National Institutes of Health, da Richardson e Bernard Weiss dell'Harvard Medical

School, da Gerard Hurwitz e colleghi dell'Albert Einstein College a New York, da Lehman e Baldomero M. Olivera a Stanford e da Nicola R. Cozzarelli del mio gruppo. Per i nostri esperimenti abbiamo usato il preparato di Lehman-Olivera.

L'enzima che salda i polinucleotidi ha la capacità di riparare le lesioni in un filamento di DNA, lesioni che si verificano quando c'è una frattura nella successione lineare dello zucchero e del residuo fosforico che costituisce l'ossatura della molecola del DNA. L'enzima può riparare la lesione soltanto se tutti i nucleotidi sono intatti e la frattura riguarda il legame covalente tra lo zucchero e il vicino residuo fosforico nella struttura del DNA.

Avendo a disposizione quest'enzima ci trovavamo ormai in condizioni di controllare se esso collaborava con la DNA polimerasi nella sintesi di un DNA virale di forma circolare e biologicamente attivo. L'uso del DNA del ΦX174 come stampo ci dava un notevole vantaggio nei confronti degli esperimenti basati sulla capacità di trasformazione del DNA. Anche se fossimo riusciti a sintetizzare un DNA dotato di tale abilità, il risultato raggiunto avrebbe avuto un valore relativo. In questo caso avremmo potuto affermare soltanto che un frammento di DNA – un frammento piccolo quanto una parte di gene – era stato assimilato dalla cellula ricevente per sostituire una sezione analoga del suo cromosoma, sostituendo una sequenza appropriata a un'altra alterata per qualche difetto o errore.

L'analisi del « prossimo vicino » può rivelare la frequenza con la quale ciascuna delle quattro basi si trova vicina a una qualsiasi base in un filamento di DNA sintetico. Si può cosí conoscere quante volte A è vicino a A, a T, a G, a C. Un atomo di fosforo radioattivo (*in colore*) viene inserito nella posizione interna di uno dei nucleotidi attivati, per esempio di A*. La molecola sintetizzata del DNA viene poi trattata con un enzima (*a destra*) che scinde la catena tra ogni fosfato e il carbonio 5′ del desossiribosio adiacente. Il fosfato viene separato dal nucleotide nella cui catena era originariamente incluso e resta attaccato al prossimo vicino che, nell'esempio riportato, è C. I quattro tipi di nucleotidi vengono separati mediante cromatografia su carta e ne viene misurata la rispettiva radioattività. Sempre allo scopo di identificare il prossimo vicino, l'esperimento viene ripetuto con fosforo radioattivo legato agli altri tre nucleotidi attivati.

Nel caso del DNA del ΦX174, Sinsheimer aveva invece dimostrato che basta cambiare uno solo dei suoi 5500 nucleotidi perché il virus non sia piú infettante. Pertanto la dimostrazione della capacità infettante di un DNA completamente sintetico avrebbe fornito la prova inequivocabile che eravamo riusciti a realizzare la sintesi di un cosí gran numero di nucleotidi, compresi i cinque o sei geni portatori della funzione biologica del virus, senza commettere errori.

In meno di un anno la sintesi in vitro del DNA del ΦX174 fu portata a termine.

Le varie fasi del procedimento possono essere cosí riassunte. Lo stampo del DNA ricavato dal ΦX174 venne marcato con tritio che è un isotopo radioattivo dell'idrogeno: il tritio in questo modo avrebbe fornito una segnalazione continua per identificare lo stampo. Allo stampo aggiungemmo la DNA polimerasi, l'enzima che salda i polinucleotidi, un cofattore (il difosfopiridinnucleotide) insieme con A*, T*, G* e C*. Uno dei nucleotidi trifosfati era marcato con fosforo radioattivo per segnalarci il materiale sintetico, cosí come il tritio faceva per lo stampo originale. La reazione procedette finché il numero delle unità polimerizzate fu esattamente uguale al numero dei nucleotidi dello stampo del DNA. Questa uguaglianza veniva facilmente determinata confrontando la radioattività del tritio dello stampo con quella del fosforo nei nucleotidi messi a disposizione per la sintesi.

Da tale confronto risultò che l'esperimento si era svolto fino a portare alla formazione di anelli complementari di DNA sintetico.

Gli anelli complementari vennero contrassegnati con (–) per distinguerli da quelli dello stampo che indicammo con (+).

A questo punto dovevamo dimostrare che gli anelli sintetici (–) erano effettivamente degli anelli, che cioè la polimerasi era riuscita a compiere un giro completo intorno allo stampo e che l'enzima specifico aveva saldato insieme le due estremità della catena.

Numerosi controlli fisici, compresi quelli al microscopio elettronico, ci assicurarono che il prodotto ottenuto era un anello chiuso avvolto intorno allo stampo del DNA e che esso era identico, per dimensioni e per altri caratteri, alla forma replicativa del DNA che compare nelle cellule infette.

Rimaneva da dimostrare se gli anelli sintetici (–) possedevano attività biologica, cioè erano infettivi, e se potevano agire a loro volta come stampo per la formazione di una forma replicativa di DNA completamente sintetica. Per risolvere il primo problema dovevamo separare i filamenti sintetici di DNA dalle forme replicative parzialmente sintetiche. Per motivi che risulteranno chiari in seguito sostituimmo la timina con il bromouracile, un analogo sintetico della timina, biologicamente attivo (*si veda l'illustrazione in alto a pagina 66*). Introducemmo poi una quantità di nucleasi sufficiente a produrre una sola lesione in uno dei filamenti di circa la metà dell'intera popolazione molecolare. I doppi anelli che erano stati scissi in tal modo avrebbero liberato un singolo filamento lineare di DNA e ci sarebbe stato possibile isolare, mediante riscaldamento, i filamenti singoli lineari da quelli circolari con cui erano in precedenza accoppiati e dagli anelli doppi che erano rimasti intatti.

Riuscimmo cosí a ottenere una miscela contenente stampi ad anello (+), anelli sintetici (–), stampi di filamenti lineari (+), e filamenti lineari sintetici (–) in proporzioni pressoché uguali e inoltre una quantità di anelli doppi completi.

Fu a questo punto che la sostituzione del bromouracile al posto della timina dimostrò la sua utilità.

Il bromouracile, contenendo un atomo di bromo al posto del gruppo metilico della timina, risulta piú pesante di quest'ultima cosicché una molecola con bromouracile può essere separata da una molecola con timina mediante centrifugazione a elevata velocità in soluzione salina concentrata (secondo la tecnica del gradiente di densità messa a punto da Jerome R. Vinograd del California Institute of Technology). Con questo metodo quanto piú densa è una sostanza tanto piú in basso essa si deposita nella provetta della centrifuga.

Ottenemmo cosí diverse frazioni che, procedendo dall'alto verso il basso della provetta della centrifuga, risultarono costituite da DNA (+) e filamento singolo contenente timina e usato come stampo, da coppie di ibridi con peso intermedio e infine da DNA (–) sintetico a filamento singolo « appesantito » dal bromouracile.

L'attendibilità del risultato ottenuto con un frazionamento di questo tipo era documentata da tre differenti massimi di radioattività corrispondenti alle tre diverse frazioni. Un'ulteriore conferma ci venne dall'osservazione che la densità media di ogni frazione corrispondeva quasi esattamente alla densità media di campioni standard di DNA virale contenenti rispettivamente bromouracile e timina.

Un'altra tecnica fisica basata sulla velocità di sedimentazione in gradiente di densità venne impiegata per separare le forme lineari sintetiche da quelle circolari sintetiche. Le forme circolari furono poi utilizzate per un esame della loro capacità infettante usando una tecnica ideata da Sinsheimer per dimostrare il potere infettante delle forme circolari del DNA del virus ΦX174.

La capacità infettante dei nostri anelli (–) venne controllata mediante incubazione con *E. coli* le cui cellule erano state private della membrana esterna ad opera dell'enzima lisozima. L'attività infettante fu valutata in base alla capacità del virus di produrre la lisi delle cellule cosí preparate dell'*E. coli*, seminate su un terreno di coltura. I nostri anelli sintetici dimostrarono una capacità infettante quasi uguale a quella degli anelli naturali: questa era la prova evidente della loro attività biologica.

Nel corso di una successiva serie di esperimenti gli anelli sintetici (–) vennero usati come stampo per accertare se potevano riprodurre una forma replicativa circolare completamente sintetica, analoga alla forma replicativa riscontrata nelle cellule infettate con virus ΦX174 naturale. Poiché gli anelli (–) sintetici erano marcati con fosforo radioattivo, questa volta aggiungemmo del tritio a una delle subunità nucleotidiche (C*). Il resto del procedimento fu sostanzialmente analogo a quello già descritto.

Riuscimmo cosí a ottenere forme replicative di ΦX174, a catena doppia, completamente sintetiche. Gli anelli (+) vennero separati e trovammo che essi erano identici, sotto ogni aspetto, agli anelli (+) del virus ΦX174 naturale e dotati, come questi, di capacità infettante.

Sinsheimer aveva già dimostrato che in queste condizioni sperimentali un cambiamento indotto in un solo nucleotide dava origine a un mutante dotato di capacità infettante assai minore.

La corrispondenza tra il potere infettante delle forme sintetiche da noi prodotte e quello degli equivalenti naturali stavano a dimostrare la precisione del processo enzimatico.

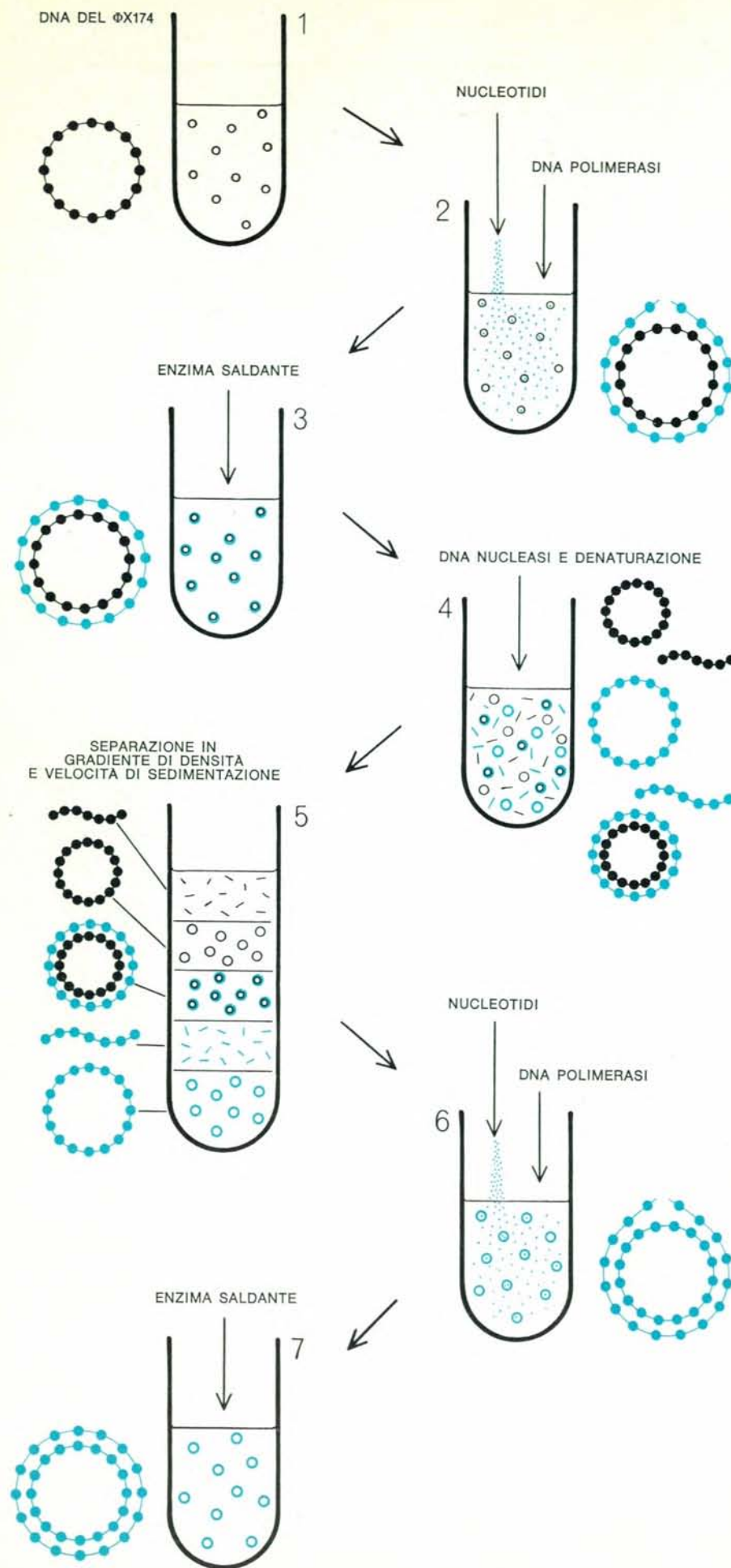
Uno sguardo al futuro

La sintesi completa del DNA virale infettante per opera della DNA polimerasi a partire dai quattro desossinucleosidi trifosfati non soltanto rivela l'abilità di questo enzima nel copiare un piccolo cromosoma (di cinque o sei geni) senza commettere errori, ma ci dimostra anche che almeno questo cromosoma ha una struttura semplice e lineare costituita dalla sequenza obbligata dei quattro desossinucleotidi. C'è ancora molta strada da percorrere per arrivare alla conoscenza del cromosoma umano che è circa diecimila volte piú grande: tuttavia possiamo ritenerci incoraggiati a estendere i nostri concetti sulla composizione dei nucleotidi e dei legami che tra di essi si stabiliscono, dal piccolo cromosoma del ΦX174 ad altri molto piú lunghi.

Quali saranno le principali direzioni che questa ricerca seguirà? Io vedo almeno tre possibilità di immediata attuazione, e promettenti come risultati. Una è rappresentata da un'accurata indagine sulla natura chimica e sulle proprietà fisiche della DNA polimerasi cosí da poter comprendere esattamente il meccanismo con cui si realizza senza errori la replica del DNA. Senza la precisa conoscenza della struttura dell'enzima e del suo meccanismo d'azione in vitro, in condizioni sperimentali ben definite, non riusciremo neppure a comprendere esattamente il comportamento dell'enzima in seno alle cellule.

In secondo luogo è necessaria una chiarificazione del meccanismo che controlla la replicazione del DNA nella cellula e nell'animale. Per esempio, perché la sintesi del DNA si arresta in una cellula matura del fegato e che cosa la rimette in movimento ventiquattro ore dopo che una parte del fegato è stata asportata chirurgicamente? Che cosa determina la velocità con cui il DNA si riproduce nelle cellule adulte, notevolmente inferiore a quella riscontrata nelle cellule embrionali e nelle cellule tumorali?

Ci sono ormai le condizioni per analizzare tutti i fattori che controllano l'inizio della sintesi del DNA e la velocità con cui il processo si svolge sia nella cellula intatta sia nell'animale. Infine esistono ora anche le premesse per utilizzare le nostre conoscenze sulla struttura e sulla sintesi del DNA a beneficio dell'umanità. Queste applicazioni riguardano il complesso problema dell'ingegneria genetica e è nostro comune dovere sfruttare tali possibilità per migliorare le condizioni della vita umana.

Un altro campo di indagini sarà logicamente quello della sintesi del virus del polioma conosciuto per la sua capacità di produrre una varietà di tumori maligni in molte specie di roditori. Il virus del polioma nella sua forma infettante risulta costituito da un doppio anello di DNA e presumibilmente si replica nella stessa forma quando penetra nella cellula ospite. Sulla base delle nostre esperienze la sintesi del DNA virale del polioma appare realizzabile. Se

questa sintesi sarà operata si riuscirà anche a provocare delle modificazioni del DNA virale fino a stabilire in quale parte del cromosoma sia localizzata la capacità di produrre tumori. Avendo a disposizione questi dati non sarà difficile modificare il virus per controllare la sua azione tumorale.

Le nostre speculazioni possono estendersi anche a piú grosse molecole di DNA. Se, per esempio, un difetto nella produzione di insulina fosse determinato da un'alterazione genetica, la somministrazione di un DNA sintetico appropriato potrebbe verosimilmente rappresentare una cura per il diabete. Dovremmo in tal caso escogitare un sistema per far penetrare nelle cellule il DNA terapeutico, cosa che non sembra impossibile.

A questo proposito un interessante suggerimento ci viene dal lavoro di Stanfield Rogers dell'Oak Ridge National Laboratory. Rogers ha dimostrato che il virus del papilloma di Shope, che non è patogeno per l'uomo, induce la produzione dell'enzima arginasi nei conigli in cui, contemporaneamente, provoca il tumore. Rogers ha riscontrato che nel sangue dei ricercatori che lavoravano su questo virus si verificava una sensibile riduzione dell'arginina, l'amminoacido che viene distrutto dall'arginasi. Questo fenomeno è verosimilmente il risultato di un'aumentata attività dell'arginasi.

Perché non dovrebbe allora esserci la possibilità di usare dei virus non patogeni similari per somministrare all'uomo i frammenti di DNA capaci di sostituire o di riparare geni difettosi?

La sintesi del DNA del ΦX174 è stata realizzata attraverso queste successive tappe. Un filamento singolo circolare del DNA del virus ΦX174, marcato con tritio, è servito come stampo (*1*). I nucleotidi attivati contenenti A, G, C e il 5′ bromouracile, al posto di T, sono stati aggiunti allo stampo insieme con DNA polimerasi. Uno dei nucleotidi attivati era stato marcato con fosforo radioattivo. Il DNA sintetizzato sulla gúida dello stampo risultò completo ma non congiunto ad anello (*2*). L'anello è stato chiuso dall'enzima che salda i polinucleotidi (*3*). Venne aggiunta una quantità di nucleasi sufficiente a tagliare un filamento in circa la metà degli anelli a doppio filamento (*4*). Si ottenne cosí una miscela di anelli doppi completi, anelli stampo originali, anelli sintetici, filamenti stampo lineari e filamenti lineari sintetici. I filamenti sintetici, contenendo il 5′bromouracile, risultarono piú pesanti di quelli dello stampo e fu possibile separarli mediante centrifugazione (*5*). Gli anelli sintetici a un solo filamento furono isolati e usati come stampi per fabbricare anelli doppi completamente sintetici (*6 e 7*).

Motori rotativi

Parecchi originali motori lavorano con moto rotatorio invece che con il tradizionale moto alternativo. Lo scopo è di unire ai pregi dei motori alternativi quelli delle turbine a gas.

di Wallace Chinitz

Solo negli Stati Uniti vengono costruiti ogni anno piú di dieci milioni di motori a combustione interna a pistoni alternativi che fanno muovere automobili, camion, barche, locomotive e aerei di piccole e medie dimensioni. Questi motori si basano su un principio dimostrato per la prima volta nel 1876 da Nikolaus August Otto, che riuscí a bruciare una miscela compressa di gas illuminante e aria nel cilindro di un motore senza causare esplosioni distruttive. Il « ciclo Otto » dei moderni motori a combustione interna con pistoni alternativi è di solito una sequenza operativa in cui il pistone compie due o quattro corse; i motori piú diffusi negli autoveicoli sono quelli a quattro corse.

La prima corsa aspira una miscela di carburante e aria nella camera di combustione, la seconda comprime la miscela, la terza (da cui si ricava potenza) avviene in corrispondenza dell'accensione della miscela, la quarta espelle i gas combusti. Il motore alternativo ha avuto tale successo che è difficile pensare che esista un piccolo esercito di inventori deciso a vederlo sostituito da qualche tipo di motore rotativo.

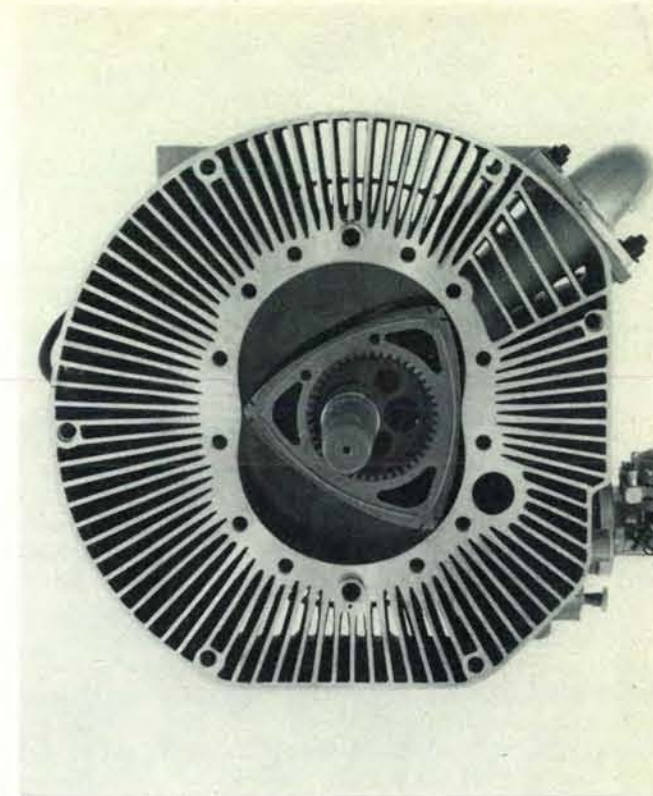
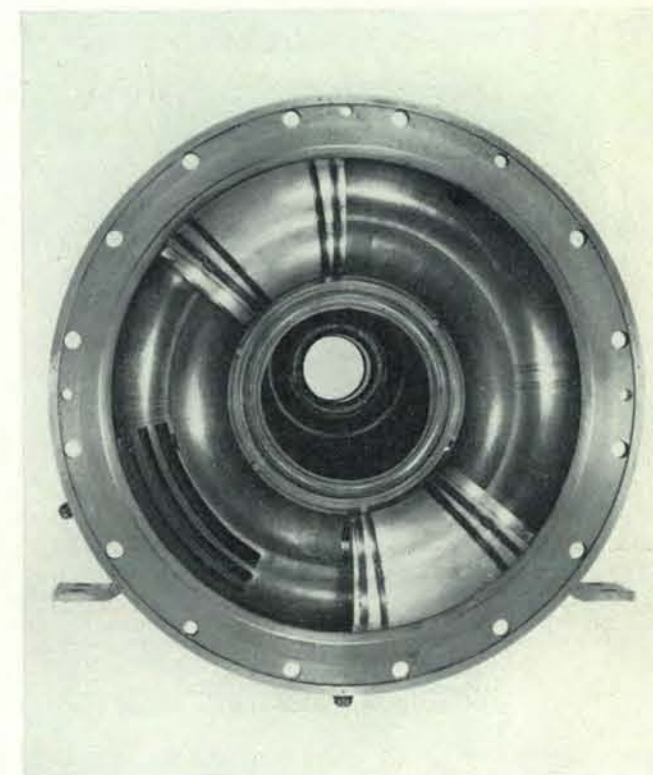
Per equipaggiare aerei ad alta velocità il motore alternativo è già stato sostituito da un motore a combustione interna non alternativo: il motore a reazione a turbina a gas, o turboreattore. Inizialmente questo riuscí a sostituire il motore alternativo per aerei, in quanto superava i limiti di velocità che erano imposti dall'uso delle eliche e poteva liberare una grande quantità di energia in un piccolo tempo. A un certo punto si scoprí che i turboreattori erano anche piú sicuri dei motori a pistoni; ma fu soprattutto l'esigenza militare di aerei ad alta velocità che indusse le maggiori potenze a investire miliardi nello sviluppo di questi motori. Come conseguenza di questi massicci investimenti militari, divennero disponibili anche per gli aerei commerciali potenti turboreattori.

Il fatto che la turbina a gas non sia riuscita a imporsi come valida alternativa al motore a pistoni per l'uso su veicoli marini e terrestri dà l'idea della sicurezza, del basso costo, del rendimento e delle alte prestazioni che questo motore ha raggiunto in circa novant'anni di sviluppo. La turbina a gas potrà forse venire impiegata nelle comuni autovetture ma i costruttori di automobili sembrano essere al riguardo meno ottimisti di quanto lo fossero all'inizio degli anni sessanta. Pertanto gli inventori che sperano che il motore Otto sia sostituito da un motore a pistoni rotanti invece che da una turbina a gas, hanno trovato solo periodici incoraggiamenti nell'industria.

Un motore rotativo, concepito nel 1956 da Felix Wankel, è attualmente installato su due vetture costruite dalla NSU Motorenwerke AG: lo *spider*, che ha un motore Wankel da 64 HP e la piú grande Ro 80, che dispone di un motore Wankel a due rotori da 125 HP.

Una vettura giapponese, la Mazda 110 S, è equipaggiata da un birotore Wankel dello stesso tipo, costruito su licenza NSU, che sviluppa 128 HP a 7000 giri al minuto. Negli Stati Uniti la Curtiss-Wright Corporation ha studiato motori del tipo Wankel per piú di otto anni. La Curtiss-Wright, in collaborazione con la Fichtel & Sachs della Germania Occidentale, ha realizzato un Wankel da 20 HP raffreddato ad aria, che è stato recentemente adottato da parecchi costruttori come sorgente di

Motore rotativo giapponese installato su una nuova berlina sportiva, la Mazda 110 S, non ancora entrata in commercio, costruita dalla Toyo Kogyo Company di Hiroshima. Il motore è del tipo Wankel e sviluppa 128 HP a 7000 giri al minuto. La Mazda copre il chilometro da ferma nel notevole tempo di 39 secondi e 5 decimi. Il motore dispone di due rotori a tre vertici alloggiati nelle due camere (*zone verticali piú chiare*) che qui si vedono di fianco. Ogni camera è dotata di due candele, probabilmente per aumentare il rendimento della combustione. Il motore ha una cilindrata totale di 980 cm^3 (490 in ogni camera) e un rapporto di compressione di 9,4 : 1.

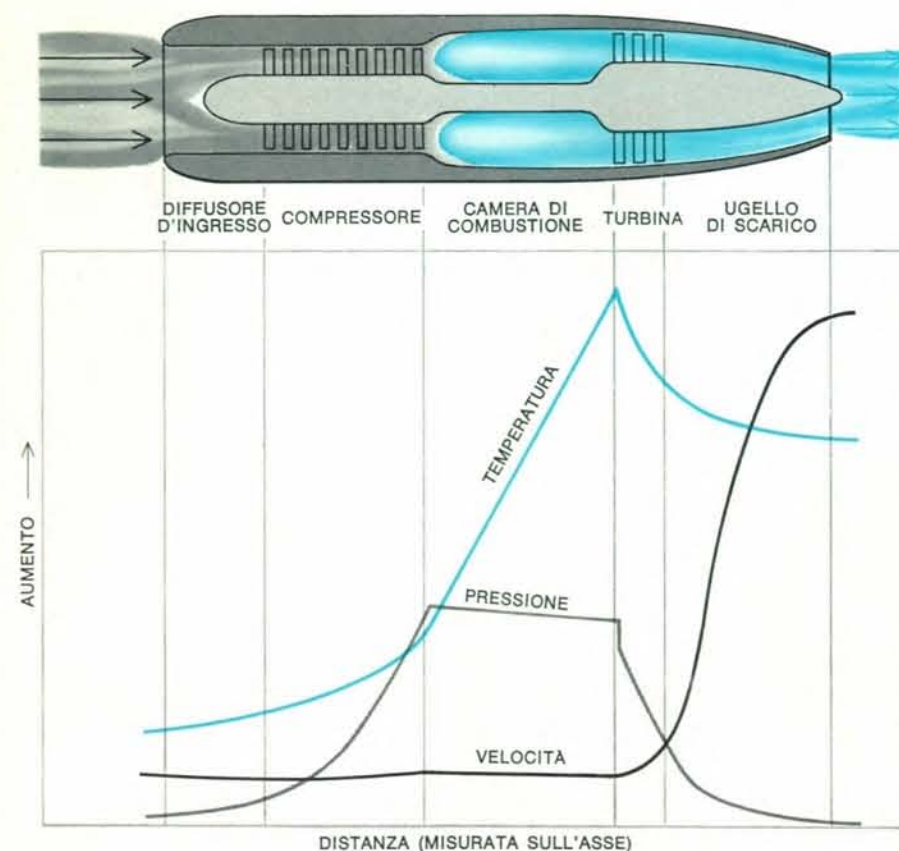
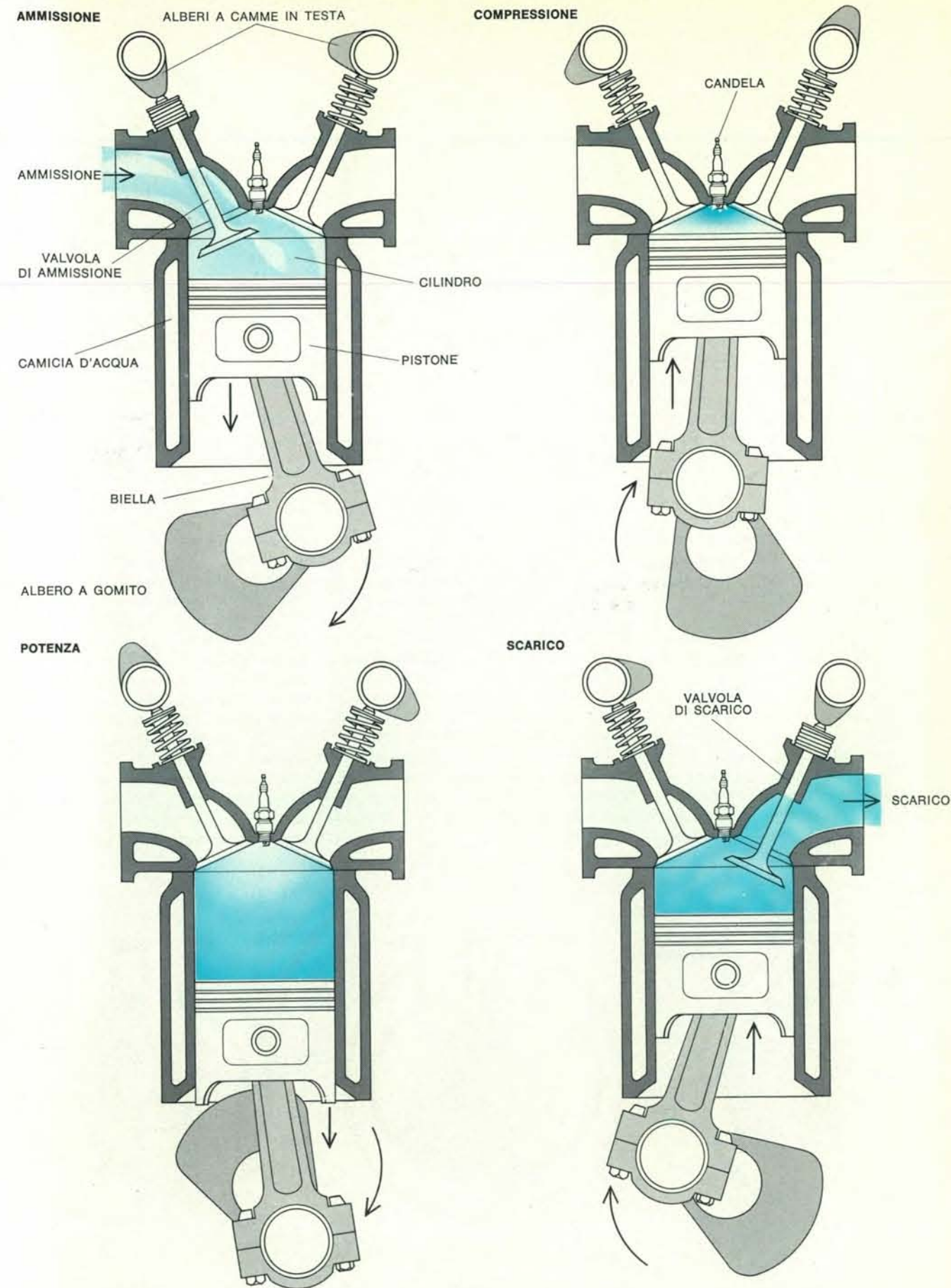
Il motore Curtiss-Wright, di tipo Wankel, è stato recentemente adottato da diversi costruttori di veicoli da neve. Le due foto mostrano come il rotore si muova nei due vani della camera durante la sua rotazione. L'ammissione è a destra in basso, lo scarico a destra in alto. Il motore è stato realizzato in collaborazione con la Fichtel & Sachs. È raffreddato ad aria e sviluppa 20 HP a 5000 giri/min. La cilindrata è di 300 cm^3 e il rapporto di compressione di 8:1. Il peso specifico è 1,2 kg/HP.

Il motore rotativo Tschudi, concepito dallo svizzero Traugott Tschudi, è stato studiato e perfezionato per piú di 40 anni. Il motore contiene due coppie di pistoni che si muovono in una camera a forma di ciambella. Queste fotografie di un prototipo in funzione sono state scattate nei laboratori della Blair Tool and Machine Corporation. Il motore è aperto per far vedere come sono collegate le due coppie di pistoni che separano le due metà della camera toroidale (*si veda la figura in alto alle pagine 82 e 83*). Il motore sviluppa 88 HP a 1600 giri/min. La cilindrata è di 1260 cm^3, il rapporto di compressione di 8:1.

energia per veicoli da neve. Il motore, che ha un solo rotore, è costruito dalla Fichtel & Sachs e distribuito negli Stati Uniti dalla Curtiss-Wright.

I relativi pregi e difetti dei motori alternativi e rotativi divengono chiari se si confronta il funzionamento di una turbina a gas con quello del ben noto motore alternativo a pistoni con accensione a scintilla. Il motore alternativo (*si veda l'illustrazione nella pagina a fronte*) consiste di un cilindro (almeno) dentro il quale si muove un pistone. Questo è unito a una biella che è collegata a una manovella e a un albero a gomiti. Sulla testa del cilindro si trovano una candela per l'accensione e due valvole: una per l'ammissione della miscela di carburante e aria e l'altra per lo scarico dei prodotti di combustione. Nella prima fase del ciclo la valvola di ammissione si apre e il pistone si sposta verso l'altra estremità del cilindro, aspirando carburante e aria. Poi, con ambedue le valvole chiuse, il pistone torna indietro, comprimendo la miscela nel cilindro. Quando il pistone ha finito, del tutto o in parte, la sua corsa, la candela scocca la scintilla che accende la miscela. La combustione, o scoppio, aumenta la pressione e la temperatura del gas, che spinge il pistone verso l'esterno, trasmettendo energia alla manovella attraverso la biella. Quando il pistone ha quasi concluso la corsa verso l'esterno, si apre la valvola di scarico attraverso la quale escono i gas combusti spinti dal pistone che ritorna indietro. Le quattro fasi del ciclo poi si ripetono. Esistono anche motori a due tempi, ampiamente usati soprattutto nei motocicli. Nel motore Diesel non è invece necessaria la scintilla per produrre l'accensione: la miscela viene compressa cosí fortemente che si accende spontaneamente alla fine della fase di compressione. Tuttavia tutti i motori alternativi hanno un'accensione discontinua.

Nei motori a turbina, invece, l'accensione è continua (*si veda l'illustrazione qui sotto*). Questo motore aspira l'aria attraverso un diffusore e poi ne aumenta la pressione per mezzo di un compressore. L'aria ad alta pressione passa poi in una camera di combustione, dove si miscela con il carburante dando luogo a una violenta combustione. I gas prodotti nella combustione vengono poi fatti passare attraverso una turbina, dove la loro pressione diminuisce e la velocità aumenta: il compito della turbina è di azionare il compressore. La velocità dei gas aumenta ancora nell'ugello di scarico prima dell'espulsione nell'atmosfera. La variazione della quantità di moto dei gas tra l'ingresso e l'uscita dal motore dà una forza risultante (spinta). Se si vuole impiegare una turbina a gas per la propulsione di una automobile, bisogna progettarla in modo da farle assorbire la maggiore quantità di energia possibile, che verrà distribuita tra il compressore e l'albero motore della vettura.

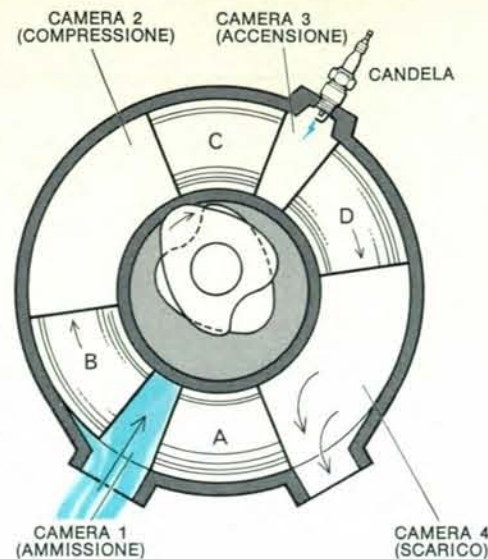
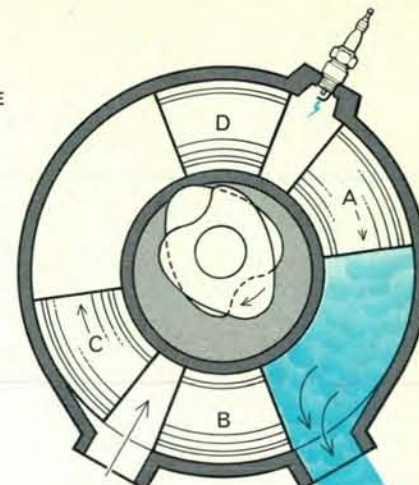
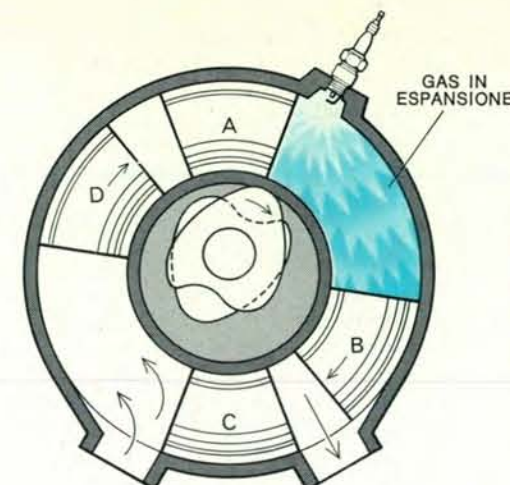
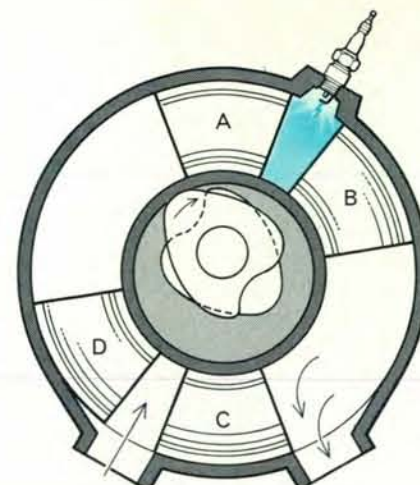
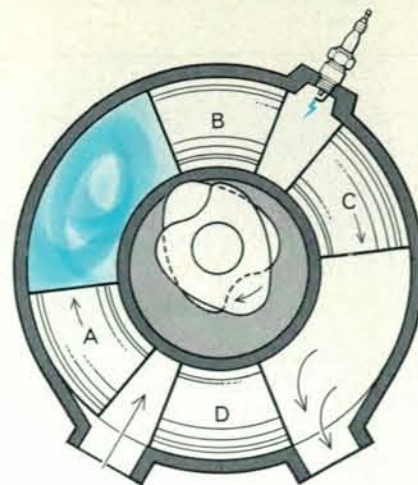
Poiché una turbina a gas fornisce potenza con continuità, e tale potenza dipende direttamente dalla quantità di combustibile che può essere bruciata nell'unità di tempo, si può ottenere una energia elevata da piccoli motori. Inoltre, l'assenza di parti che si muovono di moto alternativo permette di sviluppare velocità piú elevate rispetto a quelle possibili in un motore a pistoni: anche questo si risolve nello sviluppo di energie maggiori. Nel motore a pistoni, la conversione del moto alternativo in moto rotatorio per mezzo del sistema biella-albero a gomiti dissipa, per propria natura, parte dell'energia fornita dal processo di combustione. Durante la corsa che genera potenza, quando cioè il pistone spinge la biella, la manovella (e l'albero a gomiti) si muove approssimativamente lungo una semicirconferenza. All'inizio della corsa del pistone, quando la manovella è vicina al punto morto inferiore, il pistone non riesce in pratica a trasmettere alla manovella nessuna forza. La forza trasmessa raggiunge il massimo quando la manovella si trova a 90° con l'asse del pistone, cioè quando il pistone è circa a mezza corsa, poi decresce ancora. Il risultato è che l'energia trasmessa all'albero a gomiti è soltanto una parte di quella sviluppata nella combustione.

D'altra parte la turbina a gas ha limiti di rendimento di altro genere. La temperatura dei gas deve essere mantenuta sufficientemente bassa per evitare la distruzione delle palette della turbina: di solito non si superano i 1100 °C. Nei motori a pistoni la temperatura piú elevata che si genera nella camera di combustione si mantiene solo per brevi periodi, quindi è possibile superare di molto la temperatura massima tollerabile dal materiale. Le massime temperature istantanee raggiunte in un normale motore alternativo sono dell'ordine dei 2500 °C. Il rendimento del motore è strettamente correlato alla mas-

DIFFUSORE D'INGRESSO
COMPRESSORE
CAMERA DI COMBUSTIONE
TURBINA
UGELLO DI SCARICO
TEMPERATURA
PRESSIONE
VELOCITÀ
AUMENTO →
DISTANZA (MISURATA SULL'ASSE)

Nel turboreattore hanno luogo contemporaneamente, in parti diverse del motore, le fondamentali funzioni di ammissione, compressione, combustione e scarico. Il grafico mostra come l'aria aspirata dal diffusore vari la propria velocità, pressione e temperatura nel compressore, come si combini col carburante nella camera di combustione, come sviluppi energia nella turbina e venga espulsa attraverso l'ugello di scarico. La variazione della quantità di moto dei gas tra l'ammissione e lo scarico fa nascere la spinta. Il piú grande turboreattore finora impiegato sugli aerei sviluppa una spinta di 20 000 chilogrammi. A 600 chilometri all'ora una spinta di 0,4 chilogrammi equivale a un HP.

Il motore a pistoni tradizionale segue le quattro fasi del ciclo Otto. Nella fase di ammissione sono aspirati aria e carburante. Durante la fase di compressione la miscela è ridotta a circa il 10 % del volume originale. L'accensione inizia la combustione: i gas in espansione danno luogo alla fase che genera potenza. Quando il pistone torna indietro i gas combusti sono espulsi.

sima temperatura raggiunta durante il ciclo termodinamico: in una moderna turbina a gas per aereo il rendimento è intorno al 20 %; in un motore alternativo di alte prestazioni raggiunge il 40 %. Questo rendimento, che è relativamente alto, aiuta a rendersi conto del perché i motori alternativi continuino a essere cosí diffusi.

Ciò che molti inventori hanno tentato di ottenere è l'eliminazione dell'albero a gomiti, di basso rendimento, che è presente nel motore alternativo, mantenendo invece il vantaggio della non continuità della temperatura massima proprio del motore tradizionale. Se si potesse ottenere tutto ciò si avrebbe un motore ideale. Attualmente esistono 30 o 40 di questi motori, tutti piú o meno « ideali ». Essi si possono raggruppare in quattro grandi categorie: 1) motori del tipo « gatto e topo » (o a forbice), che differiscono dai motori alternativi classici soltanto per il fatto che i pistoni si muovono lungo un percorso circolare; 2) motori con rotore eccentrico, nei quali il movimento è trasmesso a un albero da un rotore eccentrico rispetto all'albero; 3) motori a rotore multiplo, che si basano sulla rotazione di due o piú rotori; 4) motori a monoblocco rotante, che conservano i pistoni alternativi, ma ottengono il moto rotatorio per mezzo di ingranaggi invece che per mezzo di manovella e albero a gomiti.

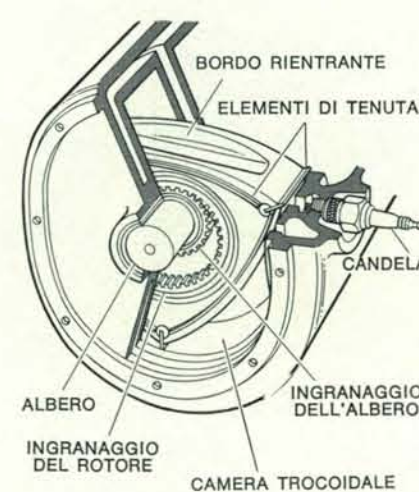
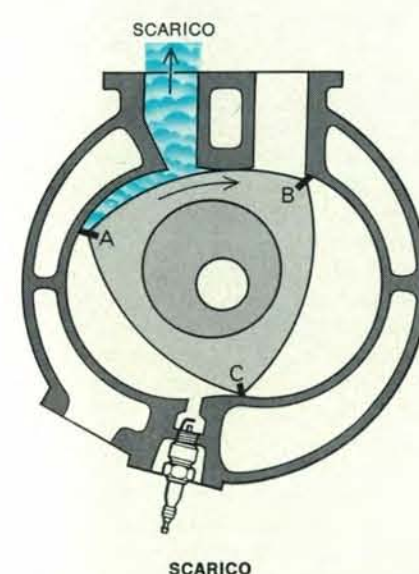
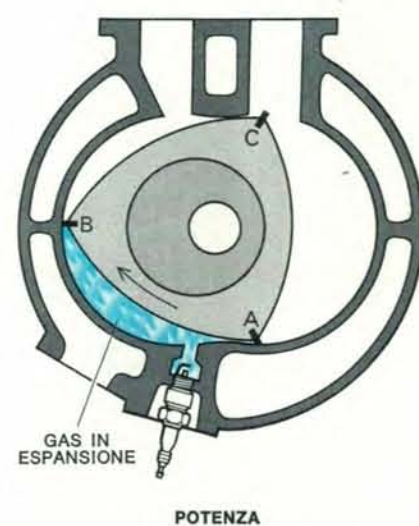
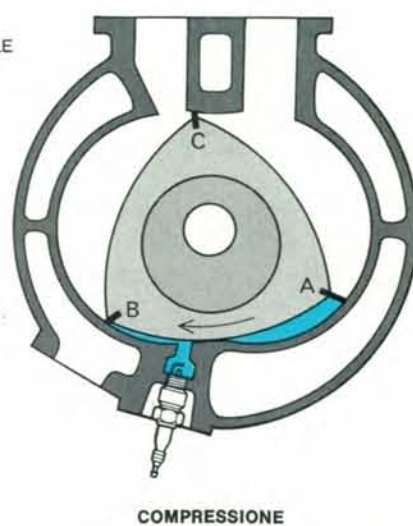
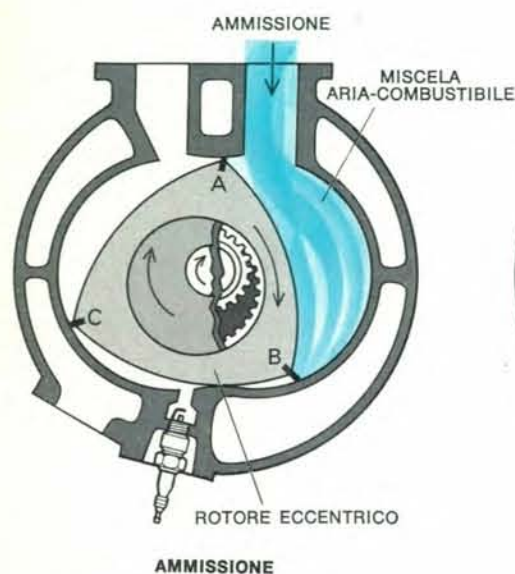
Descriverò alcuni motori tra i piú interessanti di ogni tipo. Il motore dovuto all'inventore svizzero Traugott Tschudi, che lo concepí nel 1927, è tipico della categoria « gatto e topo ».

Il motore Tschudi è uno dei motori rotativi « gatto e topo », cosí chiamati perché i pistoni si rincorrono e si allontanano. In questo motore hanno luogo contemporaneamente, in diverse parti di una camera toroidale, le fasi di ammissione, compressione, combustione e scarico. I pistoni *A* e *C* sono collegati a un rotore e si muovono insieme a 180° l'uno dall'altro; anche i pistoni *B* e *D* sono collegati a un rotore. La sequenza delle vicende (*in colore*) che hanno luogo tra *A* e *B* è ripetuta tra *B* e *C*, *C* e *D*, *D* e *A*. Per non complicare i disegni sono state omesse le rotelle che si ingranano con le camme collegate all'albero motore.

Nel motore Tschudi (*si veda l'illustrazione in alto*) i pistoni sono sezioni di toro e si muovono in un cilindro toroidale. Il cilindro contiene quattro pistoni che operano in coppia: i componenti di ogni coppia si trovano sempre a 180° tra loro, ma i pistoni di coppie diverse si trovano in posizioni relative variabili. Questa variabilità è utilizzata per produrre il corrispondente delle quattro corse del ciclo Otto. Se si segue il movimento del pistone *A* (della coppia *AC*), e del pistone *B* (della coppia *BD*), si capisce perché il motore Tschudi è chiamato del tipo « gatto e topo ».

La fase di ammissione ha inizio con *A* e *B* vicini; mentre *A* resta fermo, *B* comincia ad allontanarsi, aspirando una miscela fresca di aria e carburante. Poi il pistone *B* si ferma e *A* si muove verso *B*: in questa corsa ha luogo la compressione. (L'energia per questa fase di compressione viene dalla corsa di potenza, dovuta all'accensione della miscela che si trova tra i pistoni *C* e *D*, che ha luogo contemporaneamente.)

La miscela compressa tra *A* e *B* si è ora portata in una posizione dove può aver luogo l'accensione. Il rotore collegato al pistone *A* si blocca, permettendo all'esplosione di allontanare *B* da *A*. Alla fine della corsa di potenza si blocca il rotore collegato a *B*, e *A* si avvicina di nuovo espellendo i gas combusti attraverso un'apposita apertura. Alla fine della sequenza di queste quattro fasi i due pistoni hanno compiuto un giro nel cilindro toroidale e si ritrovano nella posizione di partenza. Si noti che in ogni istante i quattro pistoni formano nel toro quattro camere: in ogni istante quindi hanno luogo le quattro fasi del ciclo Otto.

Il movimento dei rotori, e quindi dei pistoni, è controllato da due camme che si appoggiano su cuscinetti collegati con i rotori: questo complesso si disinserisce quando si vuole fermare il rotore a cui è collegato. I carichi impulsivi conseguenti alla partenza e alla fermata dei rotori possono costituire un problema ad alte velocità, sebbene sembri che Tschudi lo abbia già risolto in qualche modo in un suo prototipo. Il problema di costruire pistoni toroidali non sembra oggi essere cosí grave come si pensava una volta. Sussistono tuttavia ancora dei problemi, come la tenuta e la lubrificazione: ma questi sono caratteristici praticamente di tutti i motori rotativi che illustrerò.

Un motore simile a quello di Tschudi per il modo di operare è stato inventato da E. Kauertz. In questo motore i pistoni sono palette, sezioni di un cilindro circolare retto; un'altra differenza consiste nel fatto che, poiché un gruppo di pistoni è collegato a un rotore che si muove a una velocità angolare costante, il moto del secondo gruppo di pistoni è controllato da un complesso insieme di ingranaggi e manovelle che permette ai pistoni di accelerare e rallentare. In questo modo il volume delle camere tra i pistoni può variare secondo un modo assegnato: quindi si può riprodurre il ciclo fondamentale dei motori a pistoni. Kauertz ha provato un prototipo che, funzionando tranquillamente, riuscí a sviluppare 213 HP a 4000 giri al minuto. Anche qui, tuttavia, la variazione della velocità angolare che si ha nel secondo gruppo di pistoni fa nascere forze d'inerzia, che sono assorbite dal complesso di ingranaggi e manovelle: a lungo andare ciò può creare problemi.

Il perché i motori di questo tipo vengano chiamati a forbice o a gatto e topo si chiarisce quando si abbia bene in mente il quadro dei pistoni, che ora si rincorrono, ora si allontanano. Altri motori di questo tipo risalgono a progetti di Hans Maier, T.C. Rayment e Melvin Rolsfmeyer (quest'ultimo ha chiamato il suo motore Virmel, dal nome di sua moglie, Virginia, e dal suo). I progetti differiscono essenzialmente nel sistema impiegato per ottenere l'effetto gatto e topo. Disponendo di fondi sufficienti per affrontare i problemi menzionati non sembrano sussistere ragioni perché uno o piú di questi motori non possano diventare competitivi

Il motore Wankel utilizza un rotore a tre vertici eccentrico rispetto all'asse; in questo motore la forma del rotore vincola quella della camera. Analogamente a quanto si verifica nel motore Tschudi, l'ammissione e lo scarico sono sempre aperti. Il rotore divide la camera principale in tre camere minori: in ogni istante si verificano contemporaneamente tre delle quattro fasi del ciclo Otto (ammissione, compressione, potenza e scarico). La sequenza delle fasi del ciclo Otto in ognuna delle camere è rappresentata in colore. L'ultima figura a destra mostra la disposizione degli ingranaggi che trasmettono la potenza all'albero motore.

rispetto al motore alternativo tradizionale. Un motivo per continuare nello studio e nello sviluppo di questi motori è la loro possibilità di ottenere un elevato rendimento di combustione: ciò significa che i loro scarichi possono produrre un basso inquinamento atmosferico. Resta da dimostrare se, a questo riguardo, possano essere realizzati in modo da risultare superiori ai motori convenzionali.

Il piú importante esempio di motore a rotore eccentrico è costituito dal Wankel, che fino a oggi è anche il piú perfezionato fra i motori rotativi. Fondamentalmente il motore ha solo due parti principali in movimento: il rotore e l'albero motore (*si veda l'illustrazione in basso nelle due pagine precedenti*). Il rotore, che ha tre vertici, si muove in un certo senso all'interno di una camera di forma particolare, il cui profilo si adatta alla forma del rotore eccentrico. Sulla periferia della camera si trovano le aperture per l'ammissione e lo scarico. (In una versione del motore l'ammissione avviene tramite un'apertura posta sul fianco, cosicché il flusso della miscela risulta parallelo all'asse del motore. Lo scopo di questa modifica è di ridurre la sovrapposizione tra la fase di ammissione e quella di scarico del ciclo operativo, ottenendo cosí un'ammissione piú breve e un minore consumo di carburante.)

Il rotore divide la camera in tre parti piú piccole che sono l'analogo dei cilindri nel motore a pistoni tradizionali. Gli eventi che hanno luogo in una camera vengono ripetuti in sequenza nelle altre durante un giro completo del rotore. Se si considera la posizione del rotore allorché nella camera 1 sta esaurendosi la fase di ammissione, si vede che contemporaneamente nella camera 2 sta avendo inizio la fase di combustione mentre nella 3 sta cominciando la fase di scarico.

Per aumentare il volume di ogni camera ogni lato della corona del rotore è incavato. Durante la fase di combustione ed espansione i gas incombusti tendono a spostarsi ad alta velocità verso la zona opposta a quella in cui avviene la combustione. La conseguenza di ciò è che questo motore, a somiglianza di quanto avviene nei motori tradizionali a pistoni, scarica incombusta parte della miscela: questo fatto, oltre a limitare le prestazioni del motore, è causa di inquinamento atmosferico. Si sta ora cercando di aumentare la turbolenza nella camera, in modo da favorire il mescolamento tra gas combusti e incombusti, migliorando cosí il rendimento della combustione. Nei piú recenti progetti della NSU tale rendimento è stato notevolmente aumentato disponendo due candele nella camera di combustione.

I motori Wankel hanno mostrato numerose caratteristiche interessanti. Anche allo stato attuale hanno per esempio prestazioni pari a quelle dei motori tradizionali, e in qualche caso superiori, per quanto riguarda la potenza erogata e la potenza per unità di peso del motore. Per aumentare la potenza sviluppata dal motore si può aumentare il numero delle unità rotore-camera collegate allo stesso albero motore, ottenendo cosí di accrescere le prestazioni piú in fretta del peso del motore. Nel caso di motori tradizionali, per aumentare la potenza senza variare il numero dei cilindri è necessario aumentare il volume di questi, con il conseguente aumento di dimensioni e peso.

Il rotore e l'albero motore di un Wankel possono essere completamente bilanciati; poiché il rotore ruota in un solo senso a velocità costante, non ci sono praticamente vibrazioni e il rumore è ridotto. Analogamente ai motori gatto e topo le aperture di ammissione e scarico sono sempre aperte e il flusso di gas che entra e che esce dal motore è continuo. Ciò elimina le valvole e i problemi a esse connessi, dovuti al fatto che devono funzionare molte volte al secondo. In cambio di questa semplificazione, però, i progettisti devono escogitare dei modi per impedire ai gas di infiltrarsi da camera a camera. Sono state realizzate tenute abbastanza efficienti usando molle e speciali metalli che mantengono una leggera pressione contro la superficie della camera.

Le prove indicano che i motori Wankel possono funzionare con una vasta gamma di carburanti senza « battere in testa »; i carburanti vanno dalla benzina normale a quella piú scadente. Questi motori sono costituiti da cosí poche parti che dovrebbero costare meno dei motori tradizionali.

Attualmente il Wankel, oltre a essere montato su vetture NSU in Germania e Toyo Kogyo (costruttore della Mazda) in Giappone, è negli Stati Uniti sottoposto a esperimenti per essere impiegato sugli autocarri e sulle barche. Un Wankel da 185 HP, usato come motore primo in un impianto di produzione di energia elettrica, è risultato meno pesante e piú conveniente, dal punto di vista del consumo di carburante, di un Diesel e di una turbina a gas con cui era stato posto a confronto. È prevedibile che piccoli Wankel potranno essere impiegati per falciatrici e seghe a nastro. Questo ampio spettro di applicazioni è dovuto al fatto che i Wankel possono essere progettati in un'insolita gamma di dimensioni. La NSU sta studiando motori con potenze che vanno da 3 a 800 HP.

Il Renault-Rambler è un altro esempio di motore a rotore eccentrico. Differisce dal Wankel per il fatto che ha valvole separate per l'ammissione e lo scarico e una candela in ognuna delle cavità della camera. In questo modo in ogni cavità ha luogo l'intero ciclo di ammissione, compressione, potenza e scarico. Le prime tre fasi avvengono tra l'ingresso e l'uscita dalla cavità di uno dei lobi del motore, la quarta (lo scarico) è effettuata dal lobo successivo. Il calore è qui meglio distribuito che nel motore Wankel.

Un altro motore a rotore eccentrico, concettualmente simile al Wankel, è attualmente in fase di sviluppo alla Renault e alla American Motors Corporation; qualche volta questo motore è chiamato Renault-Rambler. Il rotore ha quattro lobi e ruota in una camera a cinque lobi (*si veda l'illustrazione nella pagina a fronte*). Quando un lobo entra in una cavità, vi comprime la miscela di aria e di carburante. Ogni cavità è dotata di una candela e di due valvole, una per l'ammissione e una per lo scarico; la presenza delle valvole rende questo motore piú complicato del Wankel, ma la tenuta fra le camere è piú semplice, in quanto ogni cavità funziona da camera di combustione, e il calore è meglio distribuito che nel Wankel, dove la combustione avviene sempre nella stessa zona della camera.

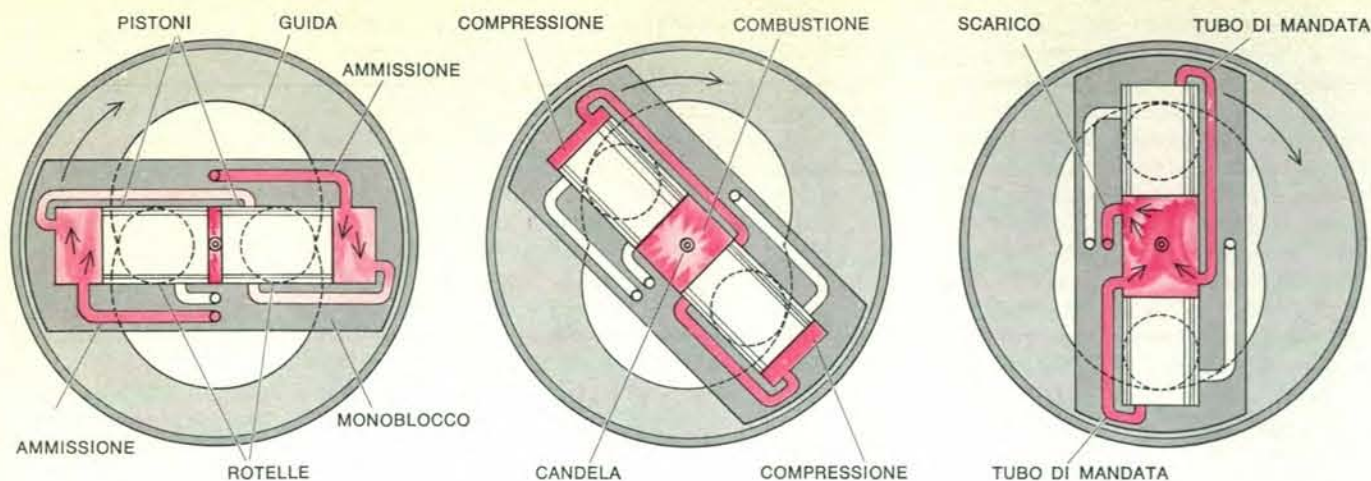
Il motore Wankel ha stimolato l'invenzione di diversi motori dello stesso tipo. Il motore Jernaes, per esempio, assomiglia al Wankel se non fosse per il fatto che non ha ingranaggi interni: il motore è invece connesso a tre planetari che lavorano su un ingranaggio calettato sull'asse motore. Il motore Ferro segue strettamente i principi del Wankel, salvo il fatto che un complicato dispositivo interno sostituisce l'albero eccentrico del Wankel. Il motore Geiger ha un rotore costituito da tre scarpe che operano su un profilo ellittico, invece che su un profilo come quello del Wankel.

La Isuzu, una ditta giapponese, ha realizzato un progetto ispirato al Renault-Rambler, dove però il rotore ha solo due lobi (invece di quattro) e la camera solo tre (invece di cinque). Altri progetti tentano il caso di tre lobi in una camera di quattro lobi. Si può facilmente concludere che i motori a rotore eccentrico hanno ormai superato la fase sperimentale. La loro essenziale semplicità li dovrebbe rendere seri concorrenti dei motori a pistoni in un'ampia serie di impieghi.

Il terzo tipo di motore non convenzionale che descriverò è quello con rotori multipli. Questi motori utilizzano semplici moti rotatori senza collegamenti eccentrici e camere di forma strana (*si veda la figura qui sotto*). In un motore di questo tipo la miscela di aria e carburante entra nella camera di combustione attraverso valvole di tipo qualsiasi. Non c'è compressione alcuna: la miscela si accende e brucia nella camera di combustione dove il gas incandescente si espande, spingendo i due rotori che si ingranano reciprocamente. Il gas resta imprigionato tra i rotori e le pareti della camera finché alla fine giunge a uno scarico aperto.

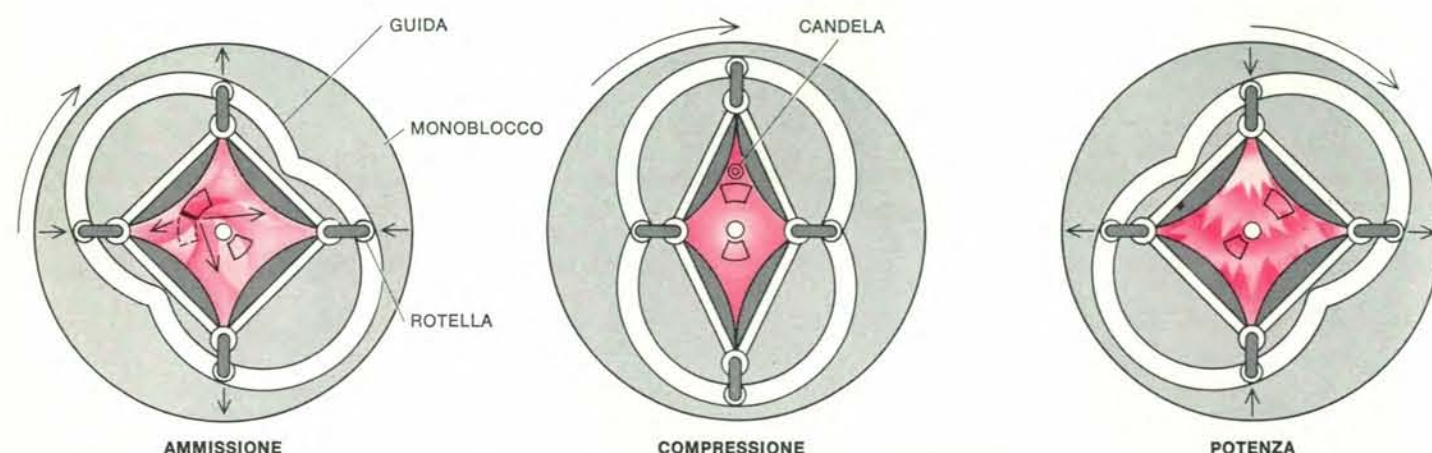
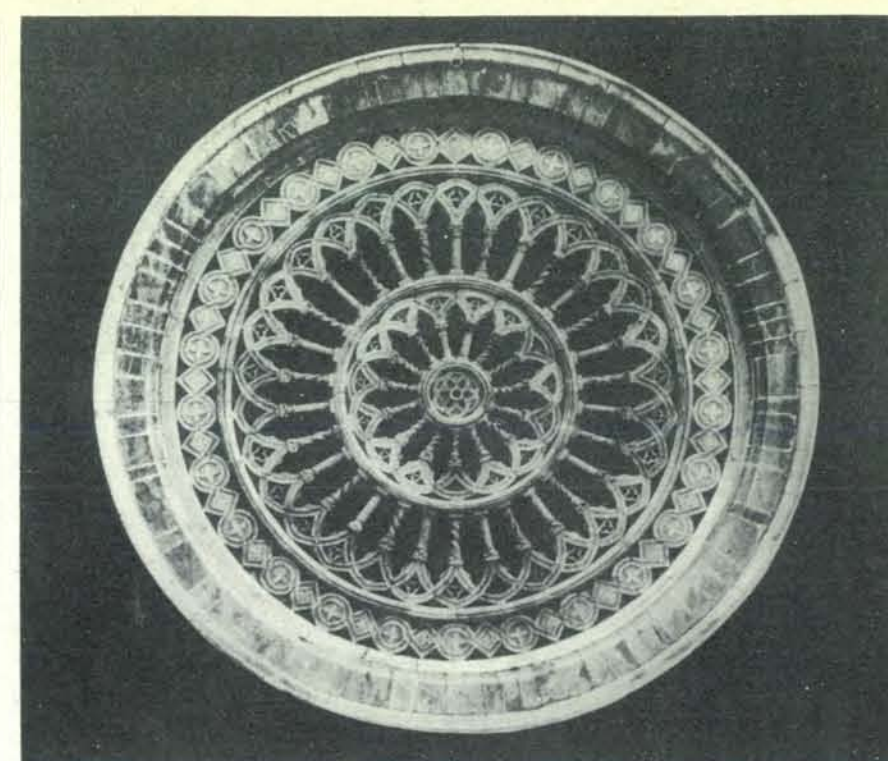
I problemi maggiori di questo genere di motore sono di due tipi: il basso rendimento conseguente all'assenza della fase di compressione e l'enorme difficoltà di ottenere una buona tenuta tra i cilindri. Una valutazione teorica del rendimento termico del motore a due rotori dà appena un valore del 4 %; malgrado ciò ci sono molti esempi di motori di questo tipo. Uno di questi, il motore Unsin, impiega due rotori circolari, uno dei quali possiede un unico dente di ingranaggio su cui agisce la pressione del gas mentre l'altro è dotato di una cavità in cui si inserisce il dente. I due rotori sono costantemente in contatto e in un piccolo prototipo la tenuta si è rivelata soddisfacente. L'inventore consiglia di prevedere una certa compressione prima dell'ammissione nel caso di motori piú grandi.

L'ultimo dei quattro tipi di motori

Questo semplice motore a piú rotori consiste di due rotori che si innestano l'uno nell'altro e si muovono in senso opposto. La miscela di aria e carburante non viene compressa nel motore, per cui il rendimento è basso. Il gas espandendosi fa muovere i rotori come indicato in figura. I gas combusti sono espulsi da un'apertura sempre libera.

Il motore Mercer è uno dei numerosi progetti insoliti in cui ruota tutto il monoblocco. Due pistoni lavorano in un solo cilindro. Collegate ai pistoni vi sono due rotelle che si muovono su una traccia fissa formata da due archi di cerchio. Quando i pistoni sono spinti ad allontanarsi dalla combustione della miscela, le rotelle agiscono sulla guida e obbligano il monoblocco a ruotare. Questo movimento dei pistoni comprime la nuova miscela che è stata immessa dietro i pistoni stessi. Quando i pistoni hanno raggiunto la massima distanza tra loro si scoprono le aperture di scarico attraverso le quali escono i gas combusti. L'espulsione è agevolata dalla immissione della nuova miscela che proviene dalla zona che sta dietro i pistoni, dove è stata compressa. Poi i pistoni si avvicinano di nuovo per ricomprimere ulteriormente la miscela prima della combustione.

rotativi comprende alcune soluzioni eterogenee piuttosto curiose: si conserva il moto alternativo dei pistoni, ma lo si combina con la rotazione di tutto il monoblocco. Un motore di questo tipo è il Mercer (*si veda la figura qui sopra*), in cui due pistoni contrapposti lavorano nello stesso cilindro. A ognuno dei due pistoni sono attaccate due rotelle che si muovono su un profilo formato da due archi di cerchio. Quando i pistoni si trovano nella posizione in cui sono più vicini tra loro, le aperture di ammissione alle due camere dietro i pistoni sono scoperte e da queste entra miscela fresca. A questo punto la miscela che si trova tra i pistoni è soggetta alla massima compressione e scocca la scintilla: in seguito alla combustione i due pistoni si allontanano comprimendo il gas che si trova dietro di loro. Ma il movimento dei pistoni causa quello delle rotelle, che sono obbligate a seguire il profilo circolare, ciò che porta alla rotazione di tutto il monoblocco. Quando i pistoni hanno terminato la corsa di allontanamento, risultano scoperte le aperture di scarico attraverso le quali escono i gas combusti. Contemporaneamente, la nuova miscela, che si trova compressa dietro i pistoni, è lasciata affluire nella zona tra i due pistoni per essere di nuovo sottoposta alle vicende di compressione e combustione causate dalla continua rotazione del blocco.

Senza dubbio parte della miscela fresca si perde insieme ai gas di scarico durante il processo di trasferimento, inoltre gli sforzi sul complesso di rotelle e sul cilindro sono piuttosto elevati e si creano difficoltà di progetto; il raffreddamento costituisce poi un altro problema, in quanto è difficile raffreddare i pistoni con una disposizione di questo tipo. D'altra parte il moto alternativo dei pistoni si converte direttamente in moto rotatorio, a differenza di quanto accade con il sistema biella-manovella del motore a pistoni tradizionale. In piú non è necessario il volano, in quanto l'intero blocco rotante ha un sufficiente momento di inerzia.

Il motore Selwood è simile, eccetto che due pistoni curvi contrapposti si muovono su un profilo toroidale. Lo schema ricorda in qualche modo il motore Tschudi « gatto e topo », solo che qui i pistoni corrono soltanto per 30° lungo il profilo toroidale. Questo moto costringe l'intero monoblocco a ruotare. Il motore Leath ha un rotore quadrato con quattro pistoni disposti a 90°, a ognuno dei quali è collegata una rotella: come nel motore Mercer il moto alternativo dei pistoni obbliga le rotelle a muoversi su un profilo particolare e quindi il monoblocco a ruotare. Il motore Porsche ha un monoblocco a croce a quattro cilindri, e anche qui i pistoni sono collegati a rotelle. In questo caso la corsa che eroga potenza è quella di avvicinamento. Il motore Rajakaruna ha una camera di combustione i cui lati sono collegati tra loro a cerniera (*si veda la figura in basso in queste due pagine*). Le variazioni di volume hanno luogo in seguito alla deformazione della camera a quattro lati causata dalla rotazione dell'alloggiamento esterno che contiene una guida dentro cui sono forzate le cerniere. I problemi che si porranno con questo motore riguardano il raffreddamento, la lubrificazione e l'usura delle cerniere e della guida.

Sebbene i quattro gruppi di motori rotativi che ho descritto non coprano affatto l'intera gamma di motori esistente, la grande maggioranza dei motori rotativi rientrano in questi. Molti dei motori introducono piccole modifiche ai progetti originari, in alcuni le variazioni sono radicali, sebbene non introducano necessariamente dei miglioramenti rispetto ai prototipi già esistenti. Si ha tuttavia la sensazione che alcuni di questi motori, purché sufficientemente sviluppati, possano costituire un passo in avanti rispetto agli attuali motori alternativi. Il motore Wankel ha già dimostrato per molti versi l'esattezza di questa aspettativa. La frase chiave è « purché sufficientemente sviluppati ». Poiché pochi tra gli inventori hanno per loro conto risorse finanziarie adeguate, essi sono obbligati a trasformarsi in venditori, con la speranza di convincere gli altri a pagare le alte spese necessarie per dimostrare la superiorità e la versatilità dei loro motori.

Nel motore Rajakaruna c'è una camera di combustione i cui 4 lati sono collegati a cerniera tra loro, in modo che la forma della sezione varia da un quadrato a un rombo e poi ancora a un quadrato, secondo le fasi del ciclo. I mutamenti di forma obbligano il motore a ruotare seguendo le quattro fasi del ciclo Otto.

La biochimica dell'ansia

Gli individui affetti da nevrosi ansiosa presentano un eccessivo aumento di lattato, normale prodotto del metabolismo cellulare; iniettando questa sostanza in soggetti di controllo si provocano i sintomi dell'ansia.

di Ferris N. Pitts jr.

Il paziente si sente veramente male, è stanco e apprensivo, gli palpita il cuore e gli manca il respiro. Di tanto in tanto lo assale la paura e è convinto di essere gravemente ammalato o perfino di star per morire. Nonostante tutto, il medico continua a dirgli che non ha niente. È questo il quadro di una persona affetta da nevrosi ansiosa, disturbo cronico che, per esempio negli Stati Uniti, colpisce circa il cinque per cento della popolazione. Gran parte dei medici sono stati incapaci di riconoscerla, figuriamoci quindi di curarla; le cause che la determinano sembravano oscure e in qualche modo « psichiche ». Nel nostro laboratorio della School of Medicine dell'Università di Washington siamo però riusciti a indurre con mezzi chimici i sintomi della nevrosi ansiosa e perfino attacchi di ansia acuta in pazienti particolarmente sensibili. A tal fine somministriamo una quantità di lattato, che è un normale prodotto del metabolismo cellulare, tale da aumentarne la concentrazione nel sangue come la si trova dopo un estenuante esercizio fisico o altro pesante sforzo fisiologico. È la prima volta che si sono prodotti attacchi di ansia mediante uno stimolo specifico. I risultati da noi ottenuti ci hanno portato ad avanzare un'ipotesi circa il meccanismo biochimico che origina i sintomi dell'ansia e sembra anche spiegare l'azione di un nuovo metodo per curare questa condizione per la quale fino a oggi non si conosceva un trattamento veramente efficace.

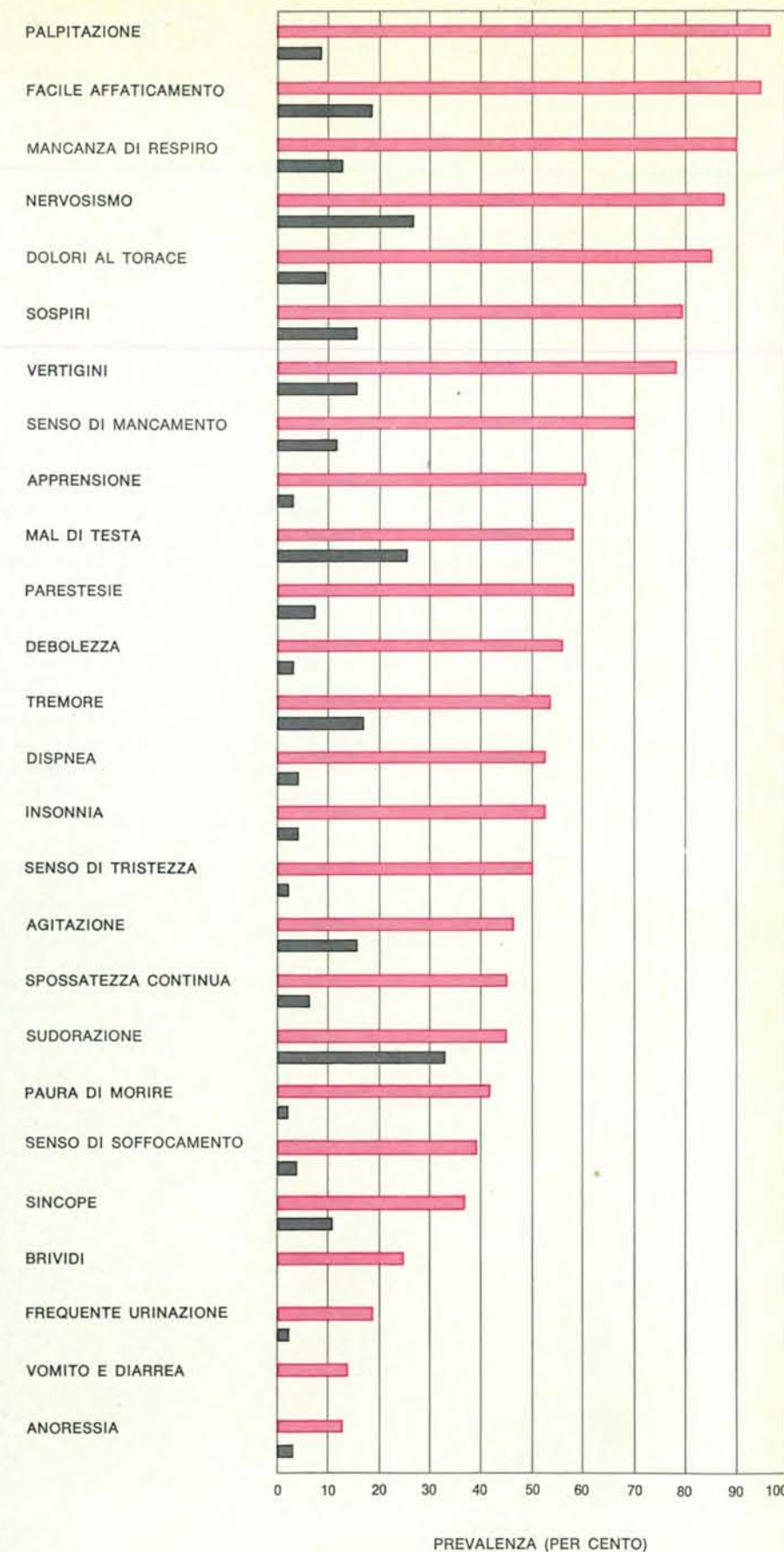
La nevrosi ansiosa è una malattia cronica familiare, caratterizzata da uno stato di tensione e apprensione, mancanza del respiro e affanno, palpitazioni, nervosismo, irritabilità, fitte e dolore al petto, debolezza, vertigini, intorpidimento e formicolio della pelle, tremore, svenimenti, e da attacchi d'ansia acuta caratterizzati da improvvisa, intensa paura di sciagure incombenti, che insorgono senza alcuna apparente ragione. Gli attacchi sono accompagnati da sensazione di soffocamento, da palpitazione: spesso si arriva al timore di un collasso cardiaco, di un cancro, di pazzia o di qualche altra grave malattia. Tutto ciò si verifica piú frequentemente all'età tra i 15 e 35 anni; i sintomi persistono con intensità variabile per molti anni senza però che si abbia riduzione della durata della vita né una maggiore sensibilità ad altre malattie. L'individuo ansioso, estenuato e preoccupato per i sintomi, si rivolge presto alle cure del medico.

Ma la visita medica non rivela nulla di anormale e cosí in genere neanche le analisi di laboratorio. Il medico si trova di fronte a un individuo che accusa molti disturbi fisici soggettivi e ha una gran paura di gravi malattie delle quali però non presenta nessun sintomo. Molto probabilmente il medico, che di solito non ha ricevuto se non uno scarso addestramento per riconoscere le varie condizioni psichiatriche sulla base dei sintomi accusati, non sa neppure che domande fare per diagnosticare la malattia. La gran parte dei medici rassicurano questi pazienti dicendo loro che tutto è a posto o prescrivendo un sedativo; dimenticano poi tutta la storia oppure accusano il paziente di essere un « fissato ».

Il paziente è tuttavia certo che i suoi sintomi sono segno di uno stato anormale e comincia a pensare che la sua malattia è tanto grave che il dottore non può dirgli la verità, oppure è a uno stadio cosí precoce da non essere riconoscibile. Naturalmente il paziente spesso si rivolge ad altri medici e piú è risoluto a uscire dal suo stato piú sono i medici da cui si fa visitare. Vengono consultati medici generici e internisti per la difficoltà del respiro e le palpitazioni cardiache, oculisti per i disturbi della vista, neurologi per le vertigini e l'intorpidimento, otorinolaringoiatri per il « nodo alla gola » e psichiatri per lo stato di ansia e le sue conseguenze nel comportamento. La psicoterapia ha poco effetto sui sintomi della nevrosi ansiosa, sebbene possa indurre il paziente ad accettare la sua condizione.

È frequente una mutua frustrazione tra medici e pazienti a causa della grande diffusione della nevrosi ansiosa. Per 10 milioni di americani ammalati ci sono 250 000 medici che praticano la professione, nel rapporto quindi di 40 a 1. L'alta incidenza di questa malattia, aggiunta al fatto che gli individui ansiosi ricorrono frequentemente ai medici, spiega perché una percentuale, che oscilla tra il 10 e il 30 dei pazienti dei medici generici e degli internisti, è affetta da nevrosi ansiosa.

Questa malattia ha avuto vari nomi; fu descritta per la prima volta nel 1863 da Alfred Stillé, un medico militare della Guerra Civile americana, che la chiamò « palpitazione del cuore ». Alcune delle altre denominazioni usate sono state: esaurimento muscolare del cuore, esaurimento nervoso, neuroastenia, cuore eccitabile e neuroastenia con larvato stato ansioso, sindrome da fatica e astenia neurocircolatoria. Il termine di nevrosi ansiosa fu introdotto nel 1895 da Sigmund Freud. Le prime descrizioni cliniche erano frammentarie e imprecise, ma nel 1871 Jacob M. Da Costa elencò quasi tutti i sintomi in un rapporto su piú di 300 casi osservati in un ospedale dell'esercito dell'Unione durante la Guerra Civile. Da Costa fece notare che la malattia non poteva essere nuova dato che ne aveva trovato complete descrizioni nei resoconti medici dell'esercito inglese durante la guerra in Crimea e descrizioni incomplete registrate in altri ospedali militari durante campagne dei due secoli precedenti. Egli sottolineò che, sebbene la malattia fosse stata riconosciuta e definita da medici militari esaminando soldati non in grado di combattere, essa non era causata dalla vita militare giacché la gran parte dei soldati l'aveva già prima di entrare nell'esercito e anche molti civili ne erano affetti. Da Costa fu anche il primo a dimostrare la natura familiare della nevrosi ansiosa e descrisse il caso di due gemelli che ne erano affetti. Come risultato del suo resoconto (che era notevolmente rigoroso quanto a struttura e contenuto, persino in confronto a molti articoli pubblicati su riviste mediche di oggi) la malattia fu a lungo conosciuta col nome di sindrome di Da Costa. Sotto molti aspetti questo è tuttora il termine migliore, essendo il solo che non implichi la conoscenza delle cause né di un particolare sistema di organi presi di mira dalla malattia stessa.

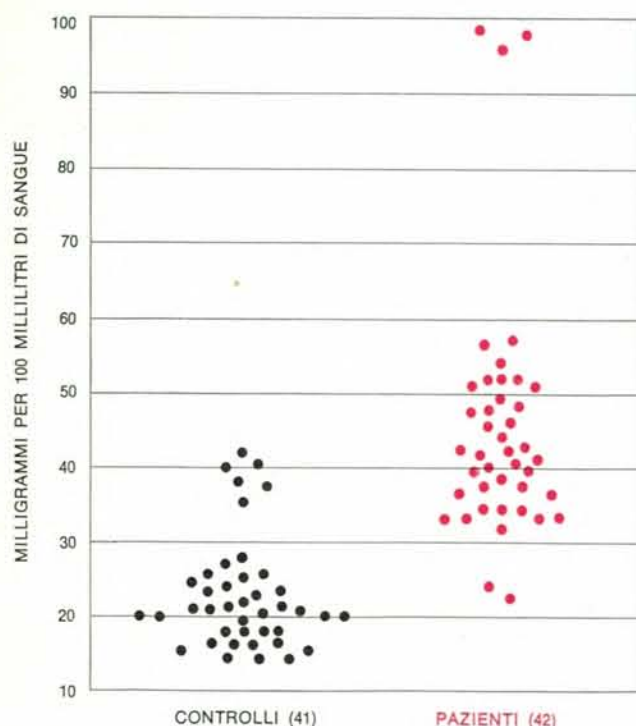
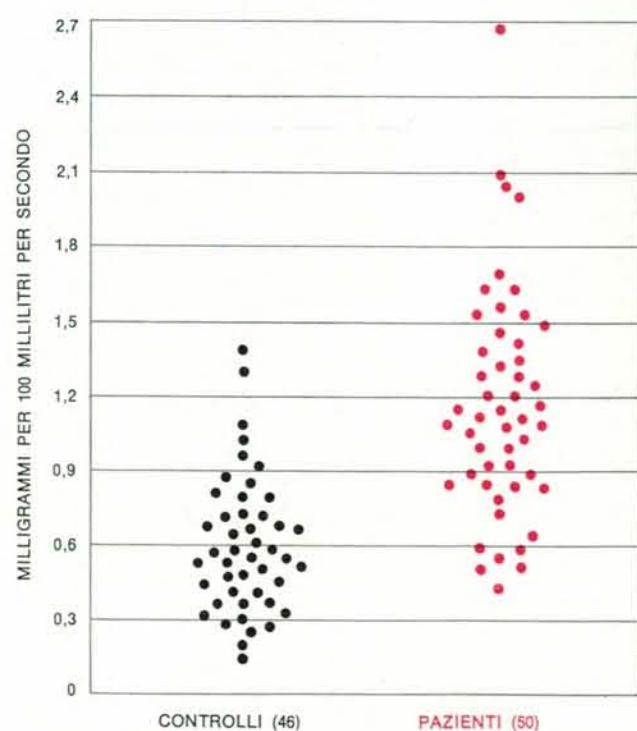
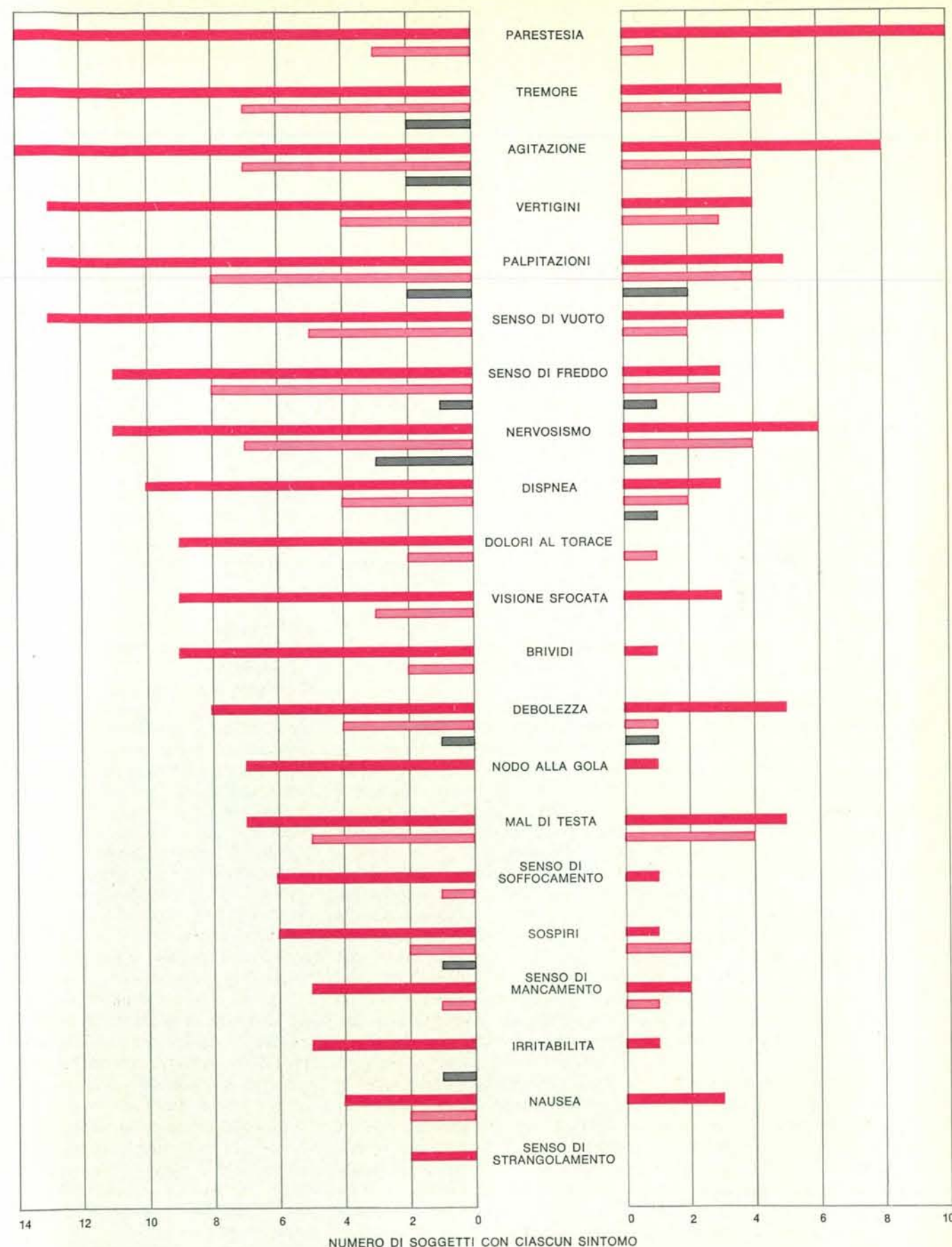
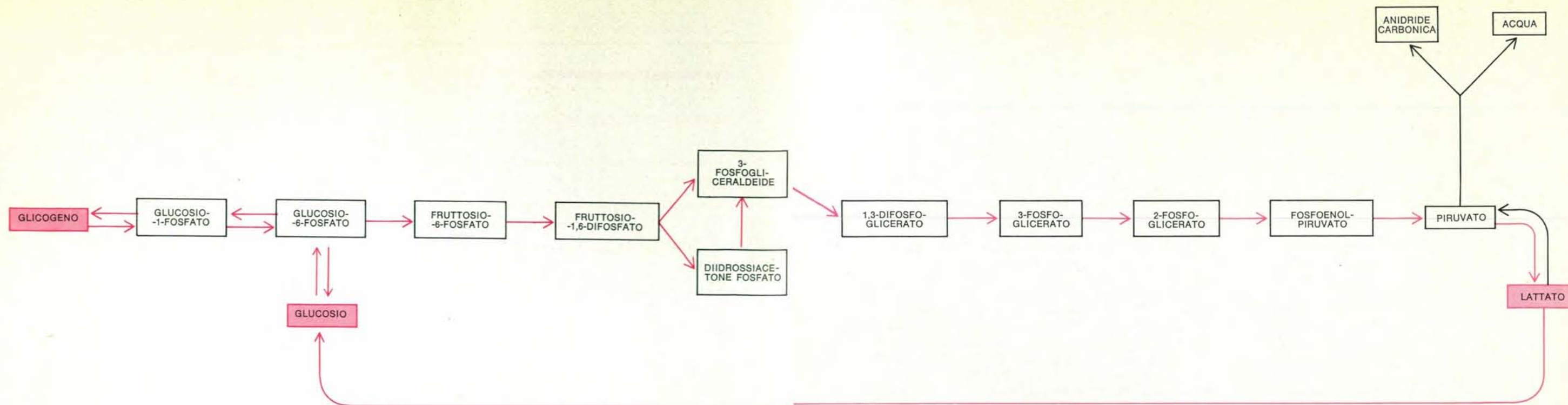
I medici non si trovano d'accordo su come condizioni diverse siano descritte dai vari termini diagnostici e su come questi termini si sovrappongano e siano in relazione tra loro. Infatti sembra impossibile distinguere la sindrome di Da Costa dall'astenia neurocircolatoria o ambedue dalla nevrosi ansiosa e dagli altri termini diagnostici con cui queste sindromi vengono indicate. I criteri per la diagnosi della nevrosi ansiosa sono tra i meno restrittivi che si usano in medicina, ma se si fa un sistematico esame psichiatrico di una persona considerata nevrotica (per qualsivoglia ragione) e si può escludere la presenza di altre condizioni psichiatriche, nel paziente si ritroveranno sintomi associati con l'astenia neurocircolatoria sufficienti a giustificare anche questa diagnosi. In breve, essendo i sintomi della nevrosi ansiosa soggettivi e presentando questa malattia un insieme di sintomi comuni a parecchie differenti malattie, ancora non conosciamo una via sicura per classificare su base clinica il gruppo di pazienti colpiti da nevrosi ansiosa. I sintomi caratteristici della nevrosi ansiosa (*si veda l'illustrazione a destra*) sono riscontrabili, in distribuzioni percentuali differenti, anche nel corso di molte condizioni di interesse psichiatrico e medico. È molto importante che i medici impa-

I sintomi della nevrosi ansiosa di 60 pazienti (*strisce colorate*) e 102 controlli (*strisce nere*) furono registrati da M.E. Cohen e P. Dudley White. Per parestesia si intende formicolio della pelle; sincope significa svenimento e anoressia perdita dell'appetito.

rino la complessa diagnostica dei sintomi dell'ansia sí che ogni paziente possa ricevere il trattamento piú appropriato.

La natura familiare della nevrosi ansiosa fu dimostrata alcuni anni fa da uno studio sistematico condotto da Paul Dudley White e dai suoi collaboratori alla Harvard Medical School. Essi trovarono che la frequenza di questa malattia in individui presi a caso tra l'intera popolazione era del 4,7 per cento, mentre tra i parenti delle persone colpite era di gran lunga piú alta. Se un genitore ne era affetto, il 48,6 per cento dei figli soffriva di nevrosi ansiosa; se lo erano ambedue i genitori la percentuale dei figli colpiti saliva a 61,9 per cento. Se ambedue i genitori non accusavano disturbi ma un figlio soffriva di nevrosi ansiosa, il 27,9 per cento degli altri figli ne erano colpiti, mentre la frequenza tra i bambini della popolazione in generale era circa del 4 per cento. Un qualche tipo di fattori deve agire nella trasmissione della nevrosi ansiosa e deve trattarsi di fattori ereditari, ma il numero dei soggetti studiato da White è troppo basso perché si possa stabilire esattamente il tipo di trasmissione in causa.

La gran parte degli studi condotti sulla popolazione civile rivela una prevalenza della nevrosi ansiosa tra le donne: ne sono colpite due donne per ogni uomo. Le ricerche del gruppo di Harvard tra le famiglie hanno dimostrato che la minor incidenza tra i maschi è probabilmente soltanto apparente: quando in una famiglia il numero dei maschi alcoolizzati che presentavano anche sintomi di ansia veniva sommato al numero di quelli che avevano solamente i sintomi della sindrome ansiosa, la somma eguagliava il numero delle donne affette da questo tipo di nevrosi. In altri termini l'alcoolismo può spesso essere sintomatico di nevrosi ansiosa negli uomini e, quando è cosí, esso rende difficile individuare nei soggetti la nevrosi ansiosa.

Alcuni sintomi della nevrosi ansiosa somigliano a quelli prodotti da uno sforzo fisico: infatti la gran parte dei pazienti ansiosi afferma che l'attività fisica può facilitare l'insorgere dei loro sintomi o aggravarli. Questi fatti spinsero i ricercatori a prendere in considerazione le varie funzioni fisiche dei nevrotici. Si è trovato che gli ansiosi sono sensibili a piú bassi livelli di stimolazione acustica, luminosa e termica di quanto lo siano i controlli; non riescono a stringere in mano un oggetto per molto tempo e il loro ritmo respiratorio aumenta piú che nei controlli in risposta al minimo fastidio (per esempio quando il medico allaccia il bracciale per misurare la pressione). Sospirano piú spesso e la respirazione diventa piú frequente quando all'aria viene aggiunta anidride carbonica; anche dopo leggeri sforzi fisici presentano un forte aumento delle pulsazioni e del ritmo respiratorio, utilizzano con minor efficienza l'ossigeno inspirato e raggiungono un piú alto livello di acido lattico nel sangue.

L'aumento di acido lattico (o lattato, se si parla della forma ionica della sostanza) è risultato di particolare interesse. Il lattato è il prodotto finale della glicolisi anaerobica che è il processo con cui le cellule scindono il glucosio (accumulato come glicogeno, sua forma di riserva) traendone energia. Durante l'attività le cellule muscolari trasformano grandi quantità di glicogeno in acido lattico, una parte del quale viene in seguito ossidato a anidride carbonica e acqua mentre la gran parte di esso diffonde nel sangue per essere alla fine nuovamente sintetizzato in glucosio nel fegato. L' aumento di lattato nel sangue è quindi un normale risultato dell'attività fisica. Ricerche eseguite negli ultimi 25 anni hanno dimostrato che in individui affetti da nevrosi ansiosa vi è un aumento eccessivo del lattato nel sangue durante l'attività fisica. Questo effetto fu notato per la prima volta da White e Mandel E. Cohen alla Harvard

La quantità di lattato nel sangue fu misurata da Cohen e White in pazienti affetti da nevrosi ansiosa e in controlli normali prima e dopo un moderato esercizio fisico (camminata) e un pesante esercizio fisico (corsa). I risultati rappresentati nel grafico per ciascun soggetto dimostrano che la concentrazione del lattato nel sangue era molto piú alta nei pazienti che nei controlli dopo aver camminato (*a sinistra*) e dopo aver corso, a parità di durata della corsa (*a destra*). I valori medi sono rispettivamente 21 per i controlli e 44,6 per i pazienti (*a sinistra*), 0,6 per i controlli e 1,48 per i pazienti (*a destra*).

I sintomi dell'ansia vennero indotti in pazienti affetti da nevrosi ansiosa (*a sinistra*) e in controlli (*a destra*), come spiegato nel testo. Le strisce indicano i soggetti che hanno riportato ciascun sintomo durante l'infusione di lattato (*colore scuro*), di lattato con calcio (*chiaro*), di glucosio in soluzione salina (*grigio*). Il lattato produsse parestesia in tutti i soggetti e altri sintomi piú spesso nei pazienti che nei non pazienti; tali sintomi non apparvero invece dopo le infusioni di controllo.

Il lattato è il prodotto finale della glicolisi anaerobica, processo con cui il glucosio viene scisso dalla cellula in assenza di ossigeno, come avviene nelle cellule muscolari durante l'esercizio fisico. Questa scissione avviene per gradi successivi, ciascuno catalizzato da un enzima, con liberazione di energia. Il lattato diffonde nel sangue, raggiunge il fegato e viene qui riconvertito in glucosio. In presenza di ossigeno, il piruvato viene ossidato in anidride carbonica e acqua attraverso la respirazione aerobica.

Medical School (*si veda la figura a pagina 90*), fu poi confermato indipendentemente da Maxwell S. Jones dell'ospedale Mill Hill di Londra, da Eino Linko dell'Università di Turku in Finlandia e da Alf G.M. Holmgren e suoi collaboratori all' Istituto Carolina di Stoccolma. I sintomi dell'ansia provocati nei pazienti dall'esercizio fisico apparivano simultaneamente a un aumentó estremamente rapido del lattato; individui normali usati come controlli non mostravano sintomi di ansia in conseguenza dell'attività fisica e presentavano soltanto il normale aumento di lattato che ci si aspettava. Negli individui affetti da nevrosi ansiosa l'aumento del lattato (per unità di lavoro e per unità di tempo) eguagliava all'incirca quello osservato in pazienti colpiti da gravi malattie come l'arteriosclerosi e la cardiopatia reumatica.

Pensai che forse lo stesso ione lattato poteva produrre attacchi d'ansia in persone sensibili. Intraprendemmo quindi uno studio esplorativo su nove pazienti e nove controlli: in tutti i pazienti e in due dei controlli insorsero tipici attacchi d'ansia in seguito a infusioni di lattato sufficienti a innalzare nel sangue il livello di questa sostanza a 12-15 millimole per litro; questi livelli vengono normalmente raggiunti soltanto per sforzi muscolari di massima intensità o dopo somministrazione di adrenalina. Questi attacchi non si verificavano nei pazienti né nei controlli con nessuna di due infusioni di controllo.

Intraprendemmo allora un piú complicato esperimento « doppio cieco » (una metodica che serve a ridurre al minimo gli errori dovuti a valutazioni soggettive). Selezionammo, sulla base di rigidi criteri, un gruppo di 14 pazienti che potevano essere sicuramente classificati come nevrotici ansiosi e scegliemmo con cura un gruppo di dieci soggetti normali da usare come controllo. Furono somministrati a ognuno dei 24 soggetti dieci millilitri per chilogrammo di peso corporeo (tra mezzo litro e tre quarti di litro) di ciascuna di tre soluzioni sperimentali; queste venivano somministrate in ordine casuale mediante infusioni endovenose in tre sedute distanziate di cinque o dieci giorni l'una dall'altra. Lo sperimentatore, il mio collega James N. McClure jr., a quel tempo non era a conoscenza del contenuto di ciascuna infusione, né della storia clinica dei soggetti e nemmeno dello scopo dell'esperimento. Egli praticò le infusioni, registrò il comportamento dei soggetti con i suoi commenti e prelevò campioni del sangue e delle urine; poi i soggetti vennero interrogati esaurientemente circa i sintomi accusati dopo le infusioni.

Le tre infusioni erano soluzioni di lattato di sodio, di lattato di sodio con aggiunta di calcio e di glucosio in cloruro di sodio. La soluzione di controllo contenente lattato di sodio con calcio era stata scelta per una ben precisa ragione. Mi era parso che molti dei sintomi della nevrosi ansiosa fossero identici a quelli osservati in casi di ipocalcemia, cioè quando nel sangue il livello degli ioni calcio è basso. Gli ioni lattato hanno una debole ma ben definita capacità di formare complessi con ioni calcio legandoli in una forma fisiologicamente inattiva. Sembrava possibile, perciò, che l'eccesso di lattato negli ansiosi potesse agire legando il calcio, il quale svolge un ruolo importante nella trasmissione degli impulsi nervosi. Il calcio nella mia infusione di controllo era all'incirca in quantità sufficiente a saturare il lattato aggiunto, cosicché quest'ultimo lasciava presumibilmente inalterato il livello del calcio nel sangue e nei fluidi dei tessuti dei soggetti. La seconda soluzione di controllo, il glucosio, fu scelto semplicemente perché, essendo il lattato il suo normale destino metabolico, non avrebbe introdotto alcun nuovo effetto biochimico nell'organismo.

Dopo la terza seduta fu chiesto a ciascun paziente di classificare le tre infusioni a seconda della intensità dei loro effetti. McClure, sempre all'oscuro di tutto, fece la stessa cosa per ciascuno dei 24 soggetti. Ciascuno dei pazienti fu in grado di identificare le tre soluzioni riferendo che il lattato di sodio aveva causato il maggior numero di sintomi, il glucosio pochissimi, o nessuno, e il lattato di sodio con calcio un numero intermedio di sintomi. Questo risultato è statisticamente molto significativo: la probabilità che i 24 soggetti valutassero correttamente tutte e tre le soluzioni per puro caso era di una su 10 000. McClure fece quasi altrettanto bene: egli valutò correttamente tutte e tre le soluzioni per 11 dei 14 pazienti e per 7 dei 10 controlli, risultato che potrebbe essere stato raggiunto per caso solo cinque volte su 10 000. (Il suo solo errore fu di invertire le due soluzioni di lattato per tre membri di ciascun gruppo.)

Il risultato piú sorprendente dell'esperimento fu che le infusioni producevano attacchi di ansia. Questa è la prima volta, per quanto mi risulta, che un tale effetto sia stato ottenuto con uno stimolo chimico, fisiologico o psicologico. Tredici dei quattordici pazienti e due dei dieci controlli ebbero tipici attacchi di ansia acuta durante l'infusione di lattato. (La differenza è statisticamente significativa e dimostra che i pazienti avevano una particolare sensibilità al lattato.) Questi nevrotici paragonarono l'effetto del lattato ai loro « attacchi peggiori ». Uno di loro ha commentato: « palpitazione, bocca secca, visione sfocata, vertigini, mal di testa e tutto proprio come nei miei momenti di crisi ». Un altro ha riferito: « Ho palpitazioni, nodo alla gola, difficoltà a respirare, tremori in tutto il corpo, non posso dominare la mia agitazione, faccio fatica a mettere a fuoco le immagini, sono molto apprensivo e nervoso; tutto ciò è cominciato con questo esperimento ». Nessuno dei soggetti di ambedue i gruppi ha avuto simili attacchi con le infusioni di controllo. In altre parole l'aggiunta del calcio ha notevolmente ridotto l'effetto del lattato sugli ansiosi.

Quando vengono presi in considerazione i singoli sintomi dell'ansia, i risultati mostrano ancora un forte effetto del lattato, un effetto mitigante del calcio ed una differenza nella risposta al lattato tra pazienti e controlli (*si veda l'illustrazione a pagina 91*).

È interessante notare che con l'infusione di lattato tutti i soggetti di ambedue i gruppi accusavano parestesia, cioè intorpidimento e formicolio della pelle, che generalmente è causata da un basso livello di calcio nei tessuti. Con l'infusione di lattato e calcio solo una piccola minoranza dei soggetti ha accusato parestesia, e nessuno con l'infusione di glucosio. Il numero di pazienti che riferí di avere provato con il lattato quasi tutti gli altri sintomi dell'ansia risultò sensibilmente piú elevato di quello dei controlli; con le due infusioni di controllo invece non vi era una differenza significativa tra i due gruppi riguardo a ciascun sintomo provato. Queste osservazioni sono valide sia considerando l'insieme di tutti i sintomi sia considerandoli singolarmente. Dei 294 sintomi possibili (21 sintomi per ciascuno dei 14 soggetti) i pazienti hanno affermato di averne provati 190 : 64,6 per cento durante l'infusione di lattato, 25,5 per cento con il lattato piú calcio e 4,4 per cento con il glucosio. Dei 210 sintomi possibili, i soggetti di controllo ne hanno provati 34,3 per cento durante l'infusione di lattato, 17,1 per cento con lattato piú calcio e 2,9 per cento con il glucosio. Dall'analisi di questi dati appare che i pazienti accusavano un numero di sintomi piú alto dei controlli per effetto del lattato ma non per effetto delle infusioni di controllo. Le infusioni di lattato producevano considerevoli effetti tardivi (cioè sintomi che si protraggono per piú di 24 ore) nei pazienti, ma non nei controlli; non c'erano invece apprezzabili effetti tardivi in nessuno dei due gruppi in seguito alle infusioni di controllo. Per esempio un paziente ha affermato: « Mi sentivo male, debole e ho avuto le vertigini per parecchi giorni; il giorno seguente non ho potuto alzarmi dal letto per andare a scuola. Due giorni

dopo ero ancora molto debole e mi sono ripreso gradualmente solo dopo vari giorni ».

Riassumiamo le osservazioni fin qui fatte. Un'infusione di lattato della durata di venti minuti in un paziente affetto da nevrosi ansiosa causava costantemente un attacco d'ansia che cominciava entro uno o due minuti dall'inizio dell'infusione, diminuiva rapidamente dopo la fine di essa, ma era spesso seguito da un periodo variabile da uno a tre giorni di spossatezza e forti sintomi di ansia. Quando veniva aggiunto il calcio alla infusione di lattato questi stessi pazienti non venivano colpiti da attacchi d'ansia e riportavano molti meno sintomi; quando erano sottoposti a infusione di glucosio in soluzione salina non presentavano quasi nessun sintomo. I soggetti di controllo accusavano molti meno sintomi e meno gravi in risposta al lattato, solo pochi sintomi dopo infusione di lattato e calcio e quasi nessuno col glucosio. Il gruppo di pazienti differiva significativamente dai controlli soltanto nel caso dell'infusione di lattato. È evidente che i pazienti rispondevano a un effetto specifico del lattato e che non si trattava di un effetto psicologico dovuto all'infusione endovenosa.

Possiamo concludere che un'alta concentrazione di ioni lattato può produrre alcuni sintomi dell'ansia in quasi tutti gli individui, che essa produce regolarmente attacchi d'ansia nei pazienti ma non nei controlli, e che gli ioni calcio prevengono in buona misura i sintomi sia nei pazienti sia nei controlli. Pensiamo che i nostri esperimenti, insieme a scoperte precedenti sull'anormale metabolismo del lattato in soggetti affetti da nevrosi ansiosa, dimostrano che gli ioni lattato possono operare in modo altamente specifico per produrre sintomi d'ansia riscontrabili in natura. Abbiamo sviluppato una teoria, che è ancora a uno stadio preliminare, secondo cui i sintomi dell'ansia possono, in ultima analisi, essere spiegati mediante un meccanismo biochimico comune: la formazione di legami tra ioni calcio e ioni lattato. Se questo fenomeno avviene nel fluido intercellulare alla superficie di membrane eccitabili come le terminazioni nervose, un eccesso di lattato potrebbe interferire col normale funzionamento del calcio nella trasmissione degli impulsi nervosi.

Qual è l'origine dell'eccesso di lattato? La differenza tra i pazienti e i controlli non è una differenza di « tolleranza » al lattato o di capacità di eliminare il lattato dal sangue; infatti in tutti i nostri soggetti l'eccesso di lattato introdotto con le infusioni veniva normalmente eliminato per opera del fegato in 60-90 minuti. Secondo la nostra teoria i sintomi dell'ansia potrebbero, in persone normali in stato di *stress*, essere dovuti a una eccessiva produzione di lattato a sua volta causata da un aumento dell'adrenalina nel sangue; si sa infatti che questa induce i sintomi dell'ansia e aumenta la produzione del lattato. L'individuo ansioso sarebbe un soggetto particolarmente suscettibile a questo meccanismo a causa di una sovrapproduzione cronica di adrenalina, di una eccessiva attività del sistema nervoso centrale, di un difetto metabolico che risulta in una eccessiva produzione di lattato, di un difetto del metabolismo del calcio, o di una combinazione di queste condizioni.

Tale meccanismo è ben lontano dall'essere stato chiarito, ma la teoria è compatibile con una nuova cura, a quanto sembra efficace, della nevrosi ansiosa. L'adrenalina stimola la produzione di lattato agendo su siti recettori metabolici della superficie cellulare attivando così nella cellula il sistema enzimatico della glicolisi. Un nuovo farmaco, l'analogo dell'adrenalina chiamato propranololo, è entrato recentemente in commercio; esso blocca questi siti metabolici e anche i siti (i recettori β-adrenergici) sui quali l'adrenalina esercita il suo effetto neurostimolante. In questi ultimi due anni sono stati fatti a Londra e nel Sud Africa esperimenti in cui il propranololo veniva somministrato alternativamente con una soluzione di controllo e si è potuto dimostrare che il propranololo può ridurre o addirittura eliminare in molti casi i vari sintomi della sindrome ansiosa.

Abbiamo così alcuni dati sugli aspetti fisiologici e biochimici dei sintomi dell'ansia caratteristici della nevrosi ansiosa; abbiamo anche un trattamento apparentemente efficace e forse specifico, che d'altra parte ci si aspetta sia efficace alla luce delle conoscenze della biochimica dell'ansia. Ancora molto lavoro dovrà essere fatto per rispondere ad alcuni importanti interrogativi. Può l'infusione di lattato causare sintomi e attacchi d'ansia in altri gruppi di pazienti ansiosi, oppure c'è più di un meccanismo alla base di questi sintomi? L'infusione di adrenalina produce sintomi d'ansia in individui affetti da nevrosi ansiosa e in altri pazienti ansiosi e, se è così, la produzione d'ansia è correlata con la produzione di lattato nel sangue? Il propranololo può bloccare i sintomi di ansia che sono stati indotti da infusioni di lattato o di adrenalina in pazienti sensibili?

dopo ero ancora molto debole e mi sono ripreso gradualmente solo dopo vari giorni ».

Riassumiamo le osservazioni fin qui fatte. Un'infusione di lattato della durata di venti minuti in un paziente affetto da nevrosi ansiosa causava costantemente un attacco d'ansia che cominciava entro uno o due minuti dall'inizio dell'infusione, diminuiva rapidamente dopo la fine di essa, ma era spesso seguito da un periodo variabile da uno a tre giorni di spossatezza e forti sintomi di ansia. Quando veniva aggiunto il calcio alla infusione di lattato questi stessi pazienti non venivano colpiti da attacchi d'ansia e riportavano molti meno sintomi; quando erano sottoposti a infusione di glucosio in soluzione salina non presentavano quasi nessun sintomo. I soggetti di controllo accusavano molti meno sintomi e meno gravi in risposta al lattato, solo pochi sintomi dopo infusione di lattato e calcio e quasi nessuno col glucosio. Il gruppo di pazienti differiva significativamente dai controlli soltanto nel caso dell'infusione di lattato. È evidente che i pazienti rispondevano a un effetto specifico del lattato e che non si trattava di un effetto psicologico dovuto all'infusione endovenosa.

Possiamo concludere che un'alta concentrazione di ioni lattato può produrre alcuni sintomi dell'ansia in quasi tutti gli individui, che essa produce regolarmente attacchi d'ansia nei pazienti ma non nei controlli, e che gli ioni calcio prevengono in buona misura i sintomi sia nei pazienti sia nei controlli. Pensiamo che i nostri esperimenti, insieme a scoperte precedenti sull'anormale metabolismo del lattato in soggetti affetti da nevrosi ansiosa, dimostrano che gli ioni lattato possono operare in modo altamente specifico per produrre sintomi d'ansia riscontrabili in natura. Abbiamo sviluppato una teoria, che è ancora a uno stadio preliminare, secondo cui i sintomi dell'ansia possono, in ultima analisi, essere spiegati mediante un meccanismo biochimico comune: la formazione di legami tra ioni calcio e ioni lattato. Se questo fenomeno avviene nel fluido intercellulare alla superficie di membrane eccitabili come le terminazioni nervose, un eccesso di lattato potrebbe interferire col normale funzionamento del calcio nella trasmissione degli impulsi nervosi.

Qual è l'origine dell'eccesso di lattato? La differenza tra i pazienti e i controlli non è una differenza di « tolleranza » al lattato o di capacità di eliminare il lattato dal sangue; infatti in tutti i nostri soggetti l'eccesso di lattato introdotto con le infusioni veniva normalmente eliminato per opera del fegato in 60-90 minuti. Secondo la nostra teoria i sintomi dell'ansia potrebbero, in persone normali in stato di *stress*, essere dovuti a una eccessiva produzione di lattato a sua volta causata da un aumento dell'adrenalina nel sangue; si sa infatti che questa induce i sintomi dell'ansia e aumenta la produzione del lattato. L'individuo ansioso sarebbe un soggetto particolarmente suscettibile a questo meccanismo a causa di una sovrapproduzione cronica di adrenalina, di una eccessiva attività del sistema nervoso centrale, di un difetto metabolico che risulta in una eccessiva produzione di lattato, di un difetto del metabolismo del calcio, o di una combinazione di queste condizioni.

Tale meccanismo è ben lontano dall'essere stato chiarito, ma la teoria è compatibile con una nuova cura, a quanto sembra efficace, della nevrosi ansiosa. L'adrenalina stimola la produzione di lattato agendo su siti recettori metabolici della superficie cellulare attivando cosí nella cellula il sistema enzimatico della glicolisi. Un nuovo farmaco, l'analogo dell'adrenalina chiamato propranololo, è entrato recentemente in commercio; esso blocca questi siti metabolici e anche i siti (i recettori β-adrenergici) sui quali l'adrenalina esercita il suo effetto neurostimolante. In questi ultimi due anni sono stati fatti a Londra e nel Sud Africa esperimenti in cui il propranololo veniva somministrato alternativamente con una soluzione di controllo e si è potuto dimostrare che il propranololo può ridurre o addirittura eliminare in molti casi i vari sintomi della sindrome ansiosa.

Abbiamo cosí alcuni dati sugli aspetti fisiologici e biochimici dei sintomi dell'ansia caratteristici della nevrosi ansiosa; abbiamo anche un trattamento apparentemente efficace e forse specifico, che d'altra parte ci si aspetta sia efficace alla luce delle conoscenze della biochimica dell'ansia. Ancora molto lavoro dovrà essere fatto per rispondere ad alcuni importanti interrogativi. Può l'infusione di lattato causare sintomi e attacchi d'ansia in altri gruppi di pazienti ansiosi, oppure c'è piú di un meccanismo alla base di questi sintomi? L'infusione di adrenalina produce sintomi d'ansia in individui affetti da nevrosi ansiosa e in altri pazienti ansiosi e, se è cosí, la produzione d'ansia è correlata con la produzione di lattato nel sangue? Il propranololo può bloccare i sintomi di ansia che sono stati indotti da infusioni di lattato o di adrenalina in pazienti sensibili?

GIOCHI MATEMATICI

di Martin Gardner

Una manciata di piccoli e divertenti problemi.

La soluzione dei seguenti problemi non richiede una cultura matematica superiore a quella fornita in genere dalla scuola secondaria, a eccezione del secondo che implica cognizioni elementari di teoria della probabilità.

1.

Questo imbarazzante problema numerico, di inventore ignoto, mi è stato comunicato da L. Vosburgh Lyons di New York. Si devono collocare i numeri da 1 ad 8 negli otto cerchi della figura in basso, rispettando la seguente clausola: nessuna coppia di numeri ordinariamente adiacenti può venire collocata in cerchi direttamente connessi da una linea. Se per esempio si mette 5 nel cerchio in cima, né 4 né 6 possono venir messi in alcuno dei tre cerchi sottostanti, dato che ognuno di questi è congiunto direttamente al cerchio in alto mediante una retta.

La soluzione è unica (non contando come diverse una rotazione o una riflessione speculare), ma è difficile trovarla senza l'aiuto di un processo logico.

2.

Il famoso racconto di Franck Stockton *La dama o la tigre?* narra di un re semibarbaro che amava amministrare uno strano tipo di giustizia. Il re sedeva su un alto trono in un lato della sua arena pubblica. Sul lato opposto vi erano due porte identiche. Il prigioniero sotto accusa poteva aprire una delle due porte, guidato solo dal « caso imparziale e incorruttibile ». Dietro una delle due porte c'era una tigre affamata; dietro l'altra un'avvenente giovane dama. Se dalla porta balzava fuori la tigre il destino dell'uomo veniva considerato una giusta punizione per il suo crimine. Se ne usciva la dama l'innocenza dell'accusato era ricompensata da un matrimonio celebrato sul posto.

Il re, avendo scoperto la relazione tra la propria figlia e un certo cortigiano, mette alla prova lo sfortunato giovane. La principessa sa quale delle porte nasconde la tigre; e sa anche che l'altra porta racchiude la piú bella dama di corte, che ha vista far gli occhi dolci al suo amante. Il cortigiano sa che la principessa sa. Ella compie una « lieve e rapida mossa » con la mano verso destra. Egli apre la porta di destra. Il racconto si chiude col tormentoso quesito: « Chi uscí dalla porta aperta, la dama o la tigre? ».

Dopo accurate ricerche su questo caso sono in grado di fare il primo rapporto completo su quanto è successo in seguito. Le due porte erano affiancate e incernierate in modo da aprirsi l'una contro l'altra. Dopo aver aperto la porta sulla destra il cortigiano aperse rapidamente anche la seconda e si barricò nel triangolo formato dalle porte e dal muro. La tigre uscí da una porta, entrò nell'altra e mangiò la dama.

Il re rimase un poco sconcertato, ma, essendo sportivo, concesse al cortigiano una seconda prova. Non volendo fornire all'astuto giovane un'altra possibilità col 50 % di probabilità, fece ricostruire l'arena in modo tale che invece di una coppia di porte ve ne fossero tre. Dietro una delle coppie mise due tigri affamate; dietro la seconda una tigre e una dama; dietro la terza due dame che erano gemelle identiche vestite nello stesso modo.

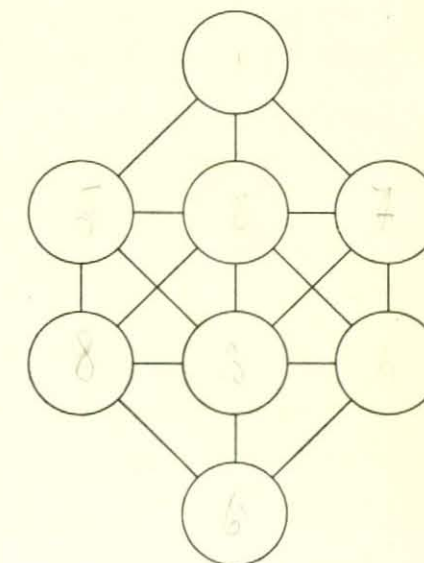
Il crudele schema era il seguente: il cortigiano doveva prima scegliere una coppia di porte; successivamente doveva sceglierne una delle due, e gli sarebbe stata lanciata la chiave per aprirla. Se usciva la tigre, era finita. Se invece usciva la dama la porta sarebbe stata chiusa immediatamente. La dama e il suo ignoto partner (o la dama gemella o la tigre) avrebbero allora cambiato segretamente posto nelle due stanze in corrispondenza al risultato del lancio di una speciale moneta d'oro con una dama su una faccia e un tigre sull'altra. Al cortigiano sarebbe stata offerta una nuova scelta tra le stesse due porte, senza sapere se la disposizione fosse la stessa di prima o no. Se sceglieva una tigre, era finita di nuovo; se capitava una dama la porta sarebbe stata richiusa, e dopo aver ripetuto la procedura del lancio della moneta al cortigiano sarebbe stata offerta una terza e ultima scelta tra le stesse due porte. Se anche l'ultima scelta era felice, avrebbe infine sposato la dama.

Quando giunse il giorno della prova tutto andò come stabilito. Per due volte il cortigiano scelse una dama. Fece del suo meglio per scoprire se la seconda dama era la stessa di prima, ma non riuscí a decidere. La sua fronte era imperlata di sudore. La faccia della principessa – che stavolta ignorava la disposizione – era pallida come marmo. Quale probabilità aveva il cortigiano di scegliere una dama alla terza prova?

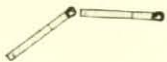
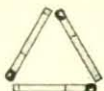
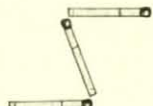
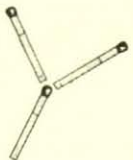
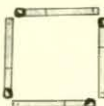
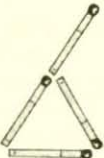
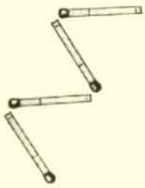
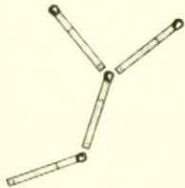
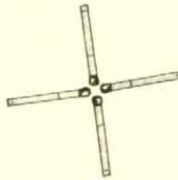
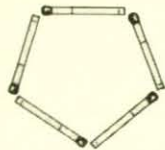
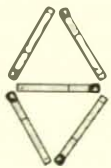
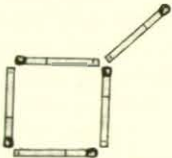
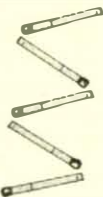
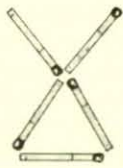
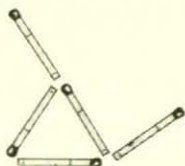
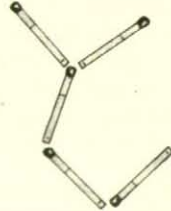
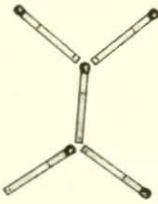
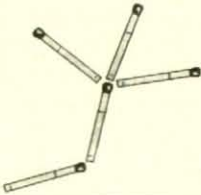
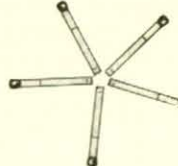
3.

Miranda batte Rosamaria in un set di tennis, vincendo sei giochi contro tre di Rosamaria. Cinque giochi sono stati vinti dalla giocatrice che non disponeva del servizio. Chi ha servito per prima?

4.

Un ricco signore aveva due piste di bowling nel seminterrato della propria abitazione. In una pista usava dieci birilli scuri, nell'altra dieci chiari. Avendo un certo istinto matematico, una sera mentre si esercitava nel tiro gli venne in mente il seguente problema: è possibile mescolare i birilli dei due colori, e poi scegliere dieci birilli da disporre nella solita formazione triangolare in modo tale che tre birilli dello stesso colore non costituiscano mai i vertici di un triangolo equilatero?

Un imbarazzante problema numerico.

Se è possibile il lettore mostri come. Altrimenti si dimostri che la cosa non è possibile. I pezzi degli scacchi possono essere un ottimo ausilio per studiare il problema.

5.

Il professor Lucius S. Wilsun è un brillante, anche se talvolta eccentrico, topologo. Il suo nome precedente era Wilson; ancora studente osservò che il proprio nome completo, Lucius Sims Wilson, scritto in lettere maiuscole, era formato per intero di lettere topologicamente equivalenti tranne la O; questo gli diede tanto fastidio da cambiare legalmente nome. Incontrandolo recentemente a pranzo lo trovai che componeva delle figure sulla tovaglia con sei cerini. « Un nuovo rompicapo topologico? », gli chiesi speranzoso. « In un certo senso » rispose. « Sto cercando di scoprire quante figure topologicamente distinte si possono fare con sei fiammiferi messi piatti sulla tavola, senza incrociarli e congiungendoli solo agli estremi ».

« Non deve essere difficile » dissi.

« Beh, è piú complicato di quello che si potrebbe pensare. Ho appena finito di comporre tutte le possibili figure con un numero inferiore di fiammiferi », e mi porse una busta sul retro della quale aveva schizzato una versione approssimativa dello schema riportato nella pagina a fronte.

« Non ha dimenticato una figura a cinque cerini? » gli chiesi. « Guardi la terza figura, il quadrato con la coda. Supponiamo di mettere la coda *dentro* il quadrato. Se i cerini restano sul piano una figura non può ovviamente essere deformata nell'altra. »

Wilsun scosse la testa. « È un errore comune a proposito dell'equivalenza topologica. È vero che se una figura può venire trasformata in un'altra allungandola o allargandola senza rotture o lacerazioni le due devono essere topologicamente identiche, o, come amiamo dire noi topologi, omeomorfe; ma non è vero il contrario; se due figure sono omeomorfe non sempre è possibile deformarne l'una nell'altra. »

« Mi scuso » dissi.

« Non formalizziamoci. Due figure sono omeomorfe se, muovendosi con continuità da punto a punto lungo una figura si può compiere un movimento corrispondente da punto a punto lungo l'altra – ovviamente i punti delle due figure devono essere in corrispondenza biunivoca. Per esempio un pezzo di filo congiunto alle estremità è omeomorfo con un pezzo di filo annodato prima che le estremità vengano congiunte, anche se ovviamente l'uno non può venire deformato nell'altro. Due sfere che si toccano esternamente sono omeomorfe a due sfere di grandezza diversa, la piccola dentro l'altra, che si toccano in un punto. »

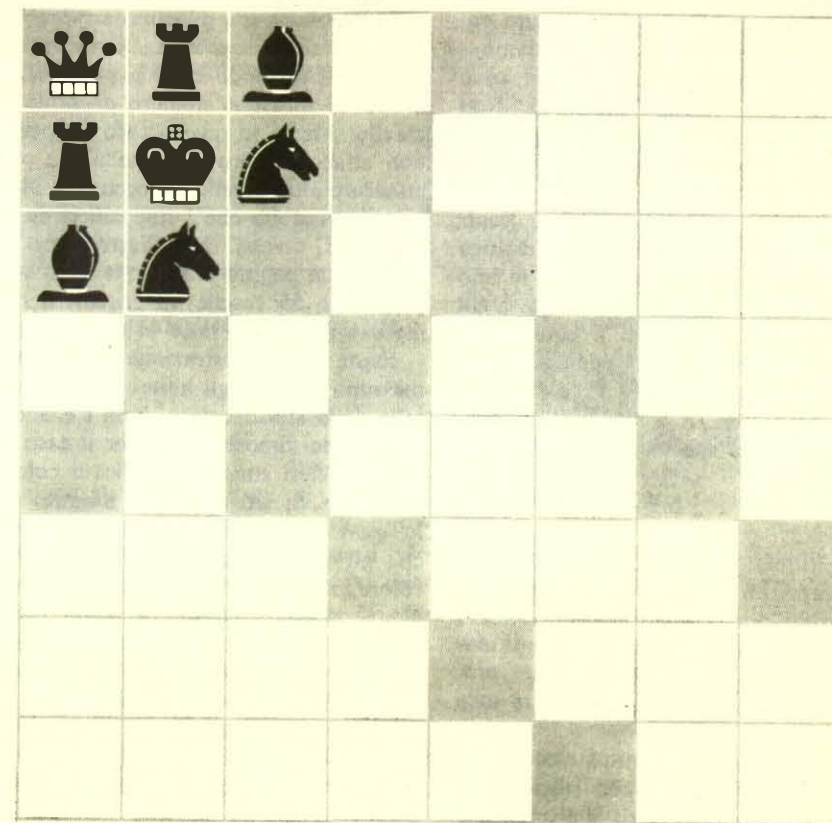
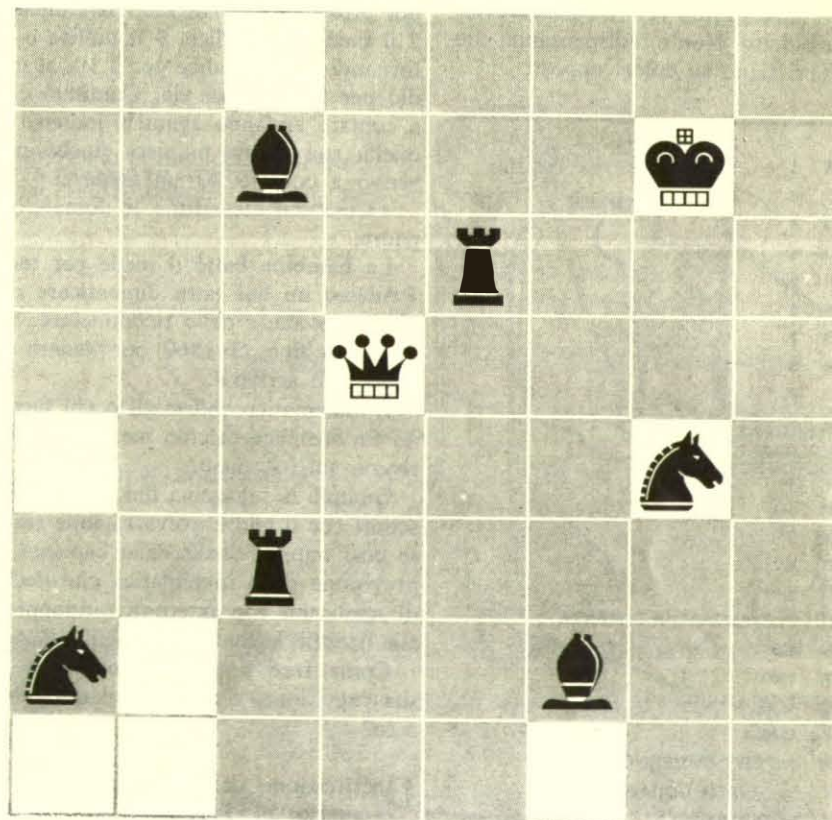
Devo essergli sembrato sconcertato, perché aggiunse subito: « Guardi, c'è un modo semplice per spiegarlo ai suoi lettori. Le figure di cerini giacciono su un piano, ma possono venire concepite come segmenti di elastici uniti alle estremità. Si possono prendere, manipolare come si vuole, rivoltarle anche, e rimetterle giú. Se una figura può venir trasformata nell'altra in questo modo vuol dire che le due figure sono topologicamente identiche. »

« Capisco, » dissi « se si concepisce una figura come incorporata in uno spazio di ordine piú elevato, allora è possibile deformare una figura in tutte le altre figure a essa topologicamente identiche. »

« Precisamente. Immaginiamo il filo infinito o le due sfere in uno spazio quadrimensionale. Il filo può venire annodato o snodato mentre le estremità rimangono unite. La piccola sfera può venire spostata dentro e fuori la sfera piú grande. »

Con questo concetto di equivalenza topologica si chiede al lettore di determinare l'esatto numero di figure topo-

NUMERO DEI FIAMMIFERI	NUMERO DELLE FIGURE TOPOLOGICAMENTE DIVERSE
1	1
2	1
3	3
4	5
5	10
6	?

Mappa delle configurazioni topologicamente diverse che si possono costruire con i fiammiferi.

Problema del minimo attacco.

Problema del massimo attacco.

logicamente differenti che possono venir formate nel piano con sei fiammiferi. Si ricordi che i fiammiferi sono rigidi e delle stesse dimensioni. Non devono venir piegati o allungati, non devono sovrapporsi e si devono toccare solo alle estremità. Ma una volta costruita una figura questa deve venir concepita come una struttura elastica che può essere presa, deformata in uno spazio tridimensionale e poi rimessa sul piano. Cosí il triangolo è equivalente a un quadrato o a un pentagono: le lettere maiuscole *E*, *F*, *T*, e *Y* sono tutte equivalenti; *R* è identico alla propria immagine speculare; e cosí via.

6.

Molti bei problemi di scacchi non implicano un atteggiamento competitivo; impiegano i pezzi e la scacchiera solo per porre impegnativi problemi matematici. Presentiamo due classici problemi di questo tipo, collegati tra loro in maniera evidente.

1) Problema del minimo attacco: piazzare gli otto pezzi di uno stesso colore (re, regina, due alfieri, due torri, due cavalli) sulla scacchiera in modo tale che sia sotto attacco il minimo numero possibile di caselle. Un pezzo non attacca la casella su cui è posato, ma naturalmente può attaccare le caselle occupate da altri pezzi. Nell'illustrazione in alto nella pagina precedente sono sotto attacco 22 caselle (in grigio), ma questo numero può venire considerevolmente ridotto. Non è indispensabile che gli alfieri siano su colori opposti.

A 1
B 2
C 3
D 4
E 5
F 6
G 7
H 8
I 9
J 10
K +
L =
M —
N 0
P ×
Q :
R ELEVAMENTO A POTENZA
S 100
T 1000
U 1/10
V 1/100
W , (PER I NUMERI DECIMALI)
Y ≅ (CIRCA UGUALE A)
Z π (PI GRECO)

Chiave del messaggio interplanetario.

2) Problema del massimo attacco: si piazzino sulla scacchiera i medesimi otto pezzi in modo tale da porre sotto attacco il massimo numero possibile di caselle. Anche in questo caso un pezzo non attacca la propria casella ma può attaccare altre caselle già occupate. Non è indispensabile che i due alfieri siano su colori diversi. Nell'illustrazione in basso nella pagina precedente sono sotto attacco 55 caselle (in grigio); il numero è molto inferiore al massimo.

Esiste una dimostrazione del numero massimo quando gli alfieri sono su caselle dello stesso colore. Non c'è ancora nessuna dimostrazione per il caso in cui gli alfieri sono su caselle di colore differente. Si ritiene che il minimo sia lo stesso indipendentemente dal fatto che gli alfieri siano o no sullo stesso colore, ma in entrambi i casi non c'è dimostrazione. Questi problemi sono stati studiati da tanti esperti di scacchi che è improbabile che le risposte ipotizzate vengano modificate. Se qualche lettore dovesse andare al di là di queste ipotesi sarebbe una grande notizia per tutti i circoli scacchistici.

7.

Lo scorso capodanno un matematico fu stupito dallo strano modo in cui la figlia di pochi anni cominciava a contare sulle dita della mano sinistra. Partiva chiamando 1 il pollice, 2 l'indice, 3 il medio, 4 l'anulare e 5 il mignolo, poi proseguiva chiamando 6 l'anulare, 7 il medio, 8 l'indice, 9 il pollice e ritornando poi all'indice per il 10, al medio per l'11, e cosí via. Continuò cosí a contare andando avanti e indietro in quella sua strana maniera finché non arrivò a contare 20 sull'anulare.

« Cosa stai facendo? » le domandò il padre.

La bambina batté il piede per terra « Adesso mi hai fatto dimenticare dov'ero arrivata, e devo ricominciare. Sto contando fino al 1969 per vedere su quale dito arrivo ».

Il matematico chiuse gli occhi facendo un semplice calcolo mentale: « Arriverai sul... », disse.

Quando la ragazzina finí di contare e scoprí che il padre aveva ragione rimase cosí impressionata dalla capacità di previsione della matematica che decise di applicarsi con intensità raddoppiata alle proprie lezioni di aritmetica.

Come fece il padre a compiere la sua previsione, e quale fu il dito indicato?

Decrittazione del messaggio interplanetario di Ivan Bell (la chiave completa è data nella figura qui a sinistra).

1. (Presentazione dei 24 simboli.)
2. (Identificazione dei primi 10 simboli, da A a J, con i numeri da 1 a 10.)
3. (Introduzione dei simboli « piú » e « uguale ».) $1 + 1 = 2$; $1 + 1 + 1 = 3$; $1 + 1 + 1 + 1 = 4$; $1 + 1 = 2$; $2 + 1 = 3$; $3 + 1 = 4$; $4 + 1 = 5$; $2 + 5 = 7$; $7 = 5 + 2$; $6 + 4 = 10$; $10 = 6 + 4$.
4. (Introduzione del segno « meno ».) $3 - 1 = 2$; $4 - 1 = 3$; $9 - 7 = 2$.
5. (Introduzione dello zero.) $3 + 0 = 3$; $8 + 0 = 8$; $4 - 4 = 0$; $5 - 5 = 0$.
6. (Introduzione della notazione posizionale in base 10. J = AN esprime J nella forma decimale 10.) $10 + 1 = 11$; $10 + 2 = 12$; $11 + 1 = 12$; $10 + 10 = 20$; $10 + 10 + 10 = 30$; $60 + 7 = 67$.
7. (Introduzione del simbolo di moltiplicazione.) $2 \times 3 = 6$; $5 \times 2 = 10$; $6 \times 10 = 60$.
8. (Introduzione del simbolo di divisione.) $6 : 2 = 3$; $10 : 2 = 5$; $60 : 6 = 10$.
9. (Introduzione degli esponenti.) $3^2 = 9$; $2^5 = 32$.
10. (Introduzione dei simboli per 100 e 1000.) $10 \times 10 = 10^2 = S = 100$; $10 \times 10 \times 10 = 10^3 = T = 1000$. $10 \times 100 = 1000$; $10 \times 1000 = 10^4$.
11. (Introduzione dei simboli per 1/10 e 1/100.) $1 : 10 = 1/10$; $1/10 : 10 = 1 : 100 = 1/100$.
12. (Introduzione della virgola per i numeri decimali.) $1/10 = 0{,}1$; $1/10 \times 2 = 0{,}2$; $1{,}4 - 1 = 0{,}4 = 4 \times 1/10$. $1/100 = 0{,}01$; $1/100 \times 3 = 0{,}03$; $1/100 : 10 = 0{,}001$; $1/100 : 100 = 0{,}0001$. $10 \times 5{,}678 = 56{,}78$; $100 \times 5{,}678 = 567{,}8$.
13. (Introduzione di « circa uguale a ».) $79{,}98 \cong 80$; $1000 + 3 \cong 1000$. (Introduzione di π.) $\pi \cong 3{,}1416$.
14. $\dfrac{4 \times \pi \times 0{,}0092^3}{3}$.

Questa espressione rappresenta il volume di una sfera di raggio 0,0092. Lo stesso Bell, nel dare la spiegazione del messaggio (« Japan Times », 29 gennaio 1960) ammise che quest'ultimo paragrafo era ambiguo, e che per essere chiaro avrebbe dovuto essere preceduto da una spiegazione sull'uso delle parentesi, o almeno da qualche indicazione sull'ordine da seguire nel compiere le operazioni aritmetiche. La formula suggerisce che si tratti di una sfera reale; se chi riceve il messaggio si trova nel nostro sistema solare non dovrebbe avere difficoltà a capire che l'unità di lunghezza è il raggio del Sole, e che il pianeta il cui raggio è 0,0092 volte quello solare è il terzo a partire dal Sole. L'espressione, infatti, che esprime il volume della Terra, fornisce un'indicazione del luogo di provenienza del messaggio.

SCIENZA IN CASA

a cura di C.L. Stong

Effetti elettrostatici e correnti di convezione nei liquidi.

In un inverno secco è facile avvertire una scossa elettrica quando si tocca la maniglia della portiera dell'automobile, si sentono crepitare gli indumenti di lana o di nylon, orlon, etc. quando ci si sveste, i capelli puliti tendono a restare ritti sulla testa dopo alcune passate di pettine. L'energia elettrica responsabile di questi fenomeni si genera ogni volta che si strofinano tra loro due corpi; tuttavia, quando il tempo è umido, essa si disperde nell'aria e attraverso le superfici umide prima che si possa accumulare una carica apprezzabile. Se l'aria è secca, invece, come in certe giornate d'inverno, è possibile che una persona accumuli una carica elettrica anche di 50 000 volt semplicemente camminando su un tappeto. È anche possibile che corpi ben isolati mantengano una carica elettrica per giorni interi; per questa ragione l'inverno è la migliore stagione per effettuare esperienze di elettrostatica.

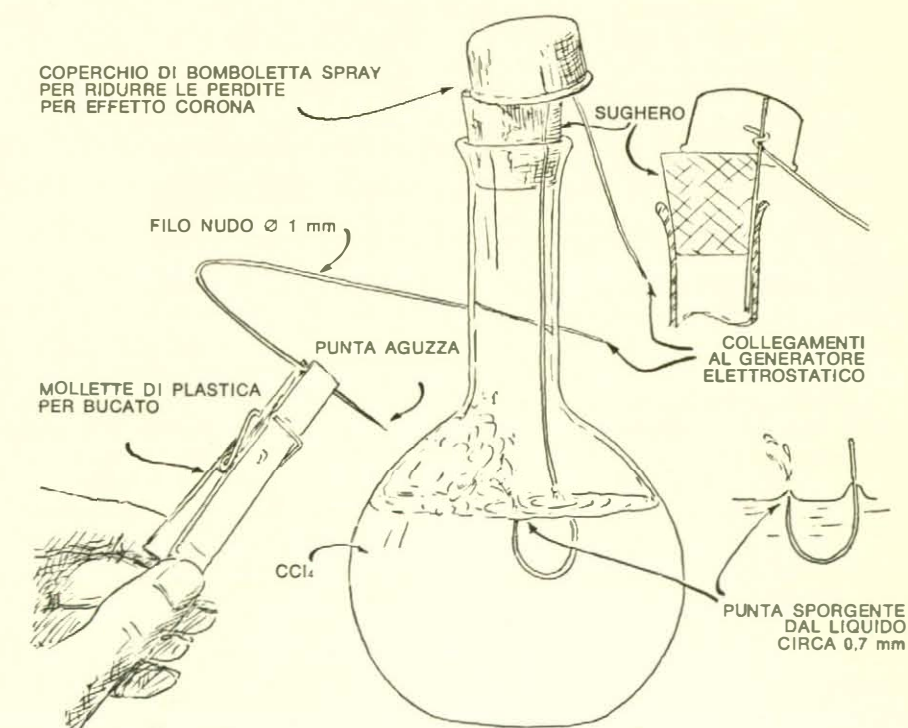
Roger Hayward ha di recente effettuato una serie di esperienze riguardanti la risposta di dielettrici liquidi a campi elettrici ad alto potenziale e il comportamento, in quei campi, di particelle di sostanze conduttrici e isolanti sospese nei liquidi. Hayward scrive: « La maggior parte delle classiche esperienze di elettrostatica che si effettuano normalmente nell'aria possono essere fatte vantaggiosamente in un dielettrico liquido, come per esempio il tetracloruro di carbonio o il cherosene. La viscosità relativamente alta di tali liquidi fa sí che i fenomeni procedano con lentezza tale da consentire l'osservazione diretta di quello che accade.

« Oltre a ciò, molti fenomeni che si verificano nei liquidi non possono essere osservati nell'aria. Per esempio, particelle isolanti di forma allungata, galleggianti nel cherosene, si dispongono secondo la direzione delle linee di forza del campo elettrico, tracciandone il disegno classico, esattamente come la limatura di ferro sparsa su un foglio di carta steso su un magnete si dispone secondo le linee di forza del campo magnetico. Questo è stato il primo esperimento da me effettuato allo scopo di osservare dove il campo elettrico fosse piú intenso, prima di studiarne l'influenza sui liquidi.

« Preparai l'esperienza versando circa mezzo litro di cherosene in una padella di Pyrex del diametro di 20 centimetri. Tagliai quindi le setole di una spazzola di peli di cammello in pezzetti lunghi circa 2 millimetri che rimescolai nel cherosene. Posai infine la bacinella su una piastra di polistirolo espanso di circa 2 cm di spessore.

« L'andamento delle linee di forza di un campo elettrico è determinato in parte dalla forma degli elettrodi. La mia prima coppia di elettrodi era costituita da un sottile filo metallico immerso verticalmente nel liquido al centro della bacinella e da un filo metallico disposto circolarmente vicino all'orlo interno della bacinella. Gli elettrodi erano connessi ai terminali di un generatore elettrostatico poco costoso, del tipo Wimshurst, che avevo comprato di seconda mano.

« Quando la macchina veniva messa in funzione, le setole si disponevano secondo le linee di forza del campo elettrico, disegnando linee radiali che univano il centro alla circonferenza. Nei campi di potenziale di questo tipo, l'intensità del campo elettrico è proporzionale alla densità delle linee di forza. Nel caso di un campo radiale la densità delle linee, e quindi l'intensità del campo elettrico, sono massime al centro. In effetti, quando azionai il generatore, l'intensità del campo al centro fu cosí elevata che il liquido spruzzò al di sopra del filo per piú di un centimetro, distruggendo, in quella regione, il disegno delle linee di forza. Ritornai a osservarlo azionando piú lentamente la macchina, cioè applicando una differenza di potenziale minore. Invertendo infine la polarità degli elettrodi non osservai nessun cambiamento nella forma del campo.

« In seguito tolsi il filo ad anello e inserii nel liquido, verticalmente e distanziati di una decina di centimetri, due fili metallici che collegai ambedue a un terminale della macchina, mentre l'altro terminale era collegato a terra. Le linee radiali si dipartivano ora da

Come sfruttare un campo elettrostatico per generare un getto di liquido.